3/1943
На дом не выдается
Инв. чит. зала
НЕ ВЫДАЕТСЯ

Н. Е. ЯРЕМЕНКО, Б. Я. СВЕТЛОВ

ТЕОРИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ

ПРОМСТРОЙИЗДАТ — 1957

На дом не выдается

Н. Е. ЯРЕМЕНКО, Б. Я. СВЕТЛОВ

ВНЗ, чит./зал
НЕ ВЫДАЕТСЯ

ТЕОРИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ

Допущено
Управлением кадров и учебных заведений МПСМ СССР
в качестве учебника для техникумов

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
ЛИТЕРАТУРЫ ПО СТРОИТЕЛЬНЫМ МАТЕРИАЛАМ
Москва — 1957

468/12
59

A1
7988

ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящий учебник составлен в соответствии с программой курса «Теория и технология взрывчатых веществ» для техникумов по специальности «Горно-взрывное дело».

В первой части учебника основное внимание уделено тем вопросам теории взрывчатых веществ, которые необходимы для понимания действия ВВ при их использовании на взрывных работах.

Во второй части рассматриваются свойства главным образом тех взрывчатых веществ, которые непосредственно используются для взрывных работ или применяются в качестве составных частей промышленных ВВ и для снаряжения средств взрывания. Учитывая довольно широкое распространение в последнее время на взрывных работах бездымных порохов, в главе 19 описываются те свойства порохов, которые должны быть учтены при использовании их в качестве взрывчатых веществ.

О пикриновой кислоте, хлоратных и перхлоратных ВВ в книге приведены лишь краткие сведения, так как в настоящее время для взрывных работ эти ВВ не используют или используют очень редко. Также мало сказано о патронах типа кардокс, вопрос о целесообразности применения которых еще не решен.

В третьей части учебника авторы ограничиваются описанием тех средств взрывания, которые широко используют при взрывных работах.

Приводятся также способы проверки качества и пригодности к использованию основных промышленных взрывчатых веществ и средств взрывания.

Учитывая, что настоящий учебник предназначен для подготовки специалистов по взрывному делу, а не технологов, вопросы производства взрывчатых веществ освещаются очень кратко.

Программой не предусмотрены и в книге не рассматриваются ВВ и средства взрывания, разработанные специально для ведения взрывных работ при добыче нефти.

Авторы выражают благодарность за ценные указания профессору, доктору технических наук К. К. Андрееву, кандидату технических наук А. В. Воронову, а также научному редактору А. Я. Апину.

Замечания и пожелания читателей авторами будут приняты с благодарностью.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время взрывчатые вещества широко используются для облегчения труда и повышения его производительности в горнодобывающей промышленности, в строительном деле, при проходке каналов, спрямлении русел рек и других работах.

Люди давно обратили внимание на энергию, заключенную в веществах, способных к быстрому горению и взрыву. Еще до нашей эры китайцы использовали для метания стрел и в качестве зажигательных составов селитросодержащие смеси. Усовершенствование этих смесей привело к открытию дымного (черного) пороха.

На основании сохранившихся материалов считают, что дымный порох в горном деле впервые был применен на одном из рудников Венгрии в 1627 г. Довольно скоро дымный порох стали широко применять на работах по строительству дорог и туннелей.

В России производство пороха началось в 1389 г. в княжение Дмитрия Донского. В первой половине XVIII в. насчитывалось уже шесть пороховых заводов. Порох использовали как в военном деле, так и для промышленных взрывных работ.

Эффективность применения дымного пороха на взрывных работах ограничивалась отсутствием в то время механизмов, которыми можно было бы делать взрывные камеры достаточно большого размера (использовались главным образом пробуренные вручную мелкие шпуры диаметром 15—20 *мм*).

Примитивным, мало надежным и небезопасным был способ воспламенения пороха в шпурах. Для этой цели применяли простейшие огнепроводы, представляющие собой камышовые трубки, заполненные порохом, или просто пороховые дорожки.

Около 500 лет (с XIV в. до половины XIX в.) дымный порох был почти единственным и непревзойденным ВВ. Причинами такого застоя в развитии взрывчатых веществ являлась замкнутость господствовавшего цехового способа производства и недостаточное развитие науки, в частности органической химии.

Поворотным пунктом в истории развития взрывчатых веществ явилось открытие возможности использования в качестве взрывчатых веществ нитроклетчатки и нитроглицерина, а вслед за этим открытие явления детонации и изобретение капсюля-детонатора.

В 1884 г. Вьелем на основе нитроклетчатки был изобретен бездымный порох, значительно превосходящий по мощности дымный.

В дело усовершенствования производства бездымных порохов большой вклад внес знаменитый русский ученый Д. И. Менделеев. Он предложил способ обезвоживания пироксилина спиртом, упростивший и обезопасивший эту операцию, разработал новый, так называемый пироколлоидный порох, который применяют и в настоящее время.

Способ использования нитроглицерина в качестве бризантного взрывчатого вещества, основанный на инициировании специальным запалом, впервые был предложен в 1854 г. русским химиком Н. Н. Зининым и практически разработан под его руководством артиллерийским офицером В. Ф. Петрушевским. Из-за консерватизма царского военного ведомства предложение Зинина не было поддержано, не получило практического применения и дальнейшего развития. Позже шведский инженер Нобель получил патенты на использование нитроглицерина, в которых нитроглицерин был назван «взрывчатым маслом Нобеля», а запал, аналогичный запалу Зинина и Петрушевского, «запалом Нобеля».

Открытие явления детонации ВВ под действием капсюля-детонатора позволило довольно быстро увеличить число веществ, пригодных к использованию в военном деле и для взрывных работ. Известную в течение многих лет пикриновую кислоту, используемую в качестве красителя шелковых и шерстяных тканей, с 1885 г. стали применять в качестве взрывчатого вещества для снаряжения боеприпасов. В начале 1900-х годов для этих же целей был использован тротил, широко применяемый в настоящее время в качестве компонента промышленных ВВ и для снаряжения боеприпасов. К этому же периоду времени относится и применение мощного взрывчатого вещества — тетрила, впервые полученного в 1877 г.

Возрастающая потребность во взрывчатых веществах и расширение области их применения привели к разработке аммиачно-селитренных ВВ, начало которым в России было положено в 1886 г. И. М. Чельцовым, предложившим смесь, состоящую из 72,5% аммиачной селитры и 27,5% пикрата аммония («громобой»).

В 20-х годах нашего столетия были получены мощные взрывчатые вещества—тэн и гексоген, производство которых совершенствуется и расширяется до настоящего времени.

Наибольшее применение в горной промышленности после дымного пороха находили нитроглицериновые взрывчатые вещества — динамиты и гризутины. С начала 30-х годов динамиты и гризутины в Советском Союзе почти полностью были заменены более безопасными и дешевыми аммиачно-селитренными ВВ (аммонитами). В последнее время аммиачно-селитренные ВВ значительно усовершенствованы, количество их составов возросло, а методы производства интенсифицируются. Разработаны аммониты высокой мощности, предохранительные аммониты для угольных шахт и серных рудников, водоустойчивые аммониты; аммониты, дающие при взрыве малое количество ядовитых газов, и другие.

Успехи в развитии промышленных ВВ тесно связаны с успехами в области развития теории ВВ. Работы советских исследователей

Н. Н. Семенова, Ю. Б. Харитона, Я. Б. Зельдовича, А. Ф. Беляева, А. Я. Апина, М. А. Лаврентьева, М. А. Садовского, К. К. Андреева, а также зарубежных ученых Шмидта, Тейлора, Джонса, Эйринга, Неймана, Мюруара и др. внесли ясность в вопросы детонационной способности взрывчатых веществ, влияния состава и физического состояния ВВ на их взрывчатые характеристики и условий взрывания на эффект взрыва ВВ.

Эти исследования позволили выработать правильный подход к разработке новых видов промышленных взрывчатых веществ и к способам их применения.

ГЛАВА I

ЯВЛЕНИЕ ВЗРЫВА

Термином взрыв нередко пользуются, когда говорят о скачкообразных изменениях, происходящих в природе. В более узком физическом смысле взрывом называют очень быстрое выделение энергии, связанное с внезапным изменением состояния вещества. Переход энергии при взрыве из потенциальной в кинетическую связан, как правило, с образованием ударной волны и совершением механической работы.

Источником взрыва могут быть электрическая, атомная, кинетическая, тепловая и химическая энергии.

Примером электрического взрыва является разряд атмосферного электричества в виде молнии. В миниатюре электрический взрыв можно наблюдать при коротком замыкании электрического тока или при разряде конденсаторов. По своей силе эти взрывы очень малы. Молния может произвести сильный звуковой и световой эффект, расщепить дерево, явиться причиной пожара, однако больших разрушений она произвести не может.

В последнее время большое значение приобретают атомные взрывы, в которых используется энергия внутриядерного превращения. Взрыв атомной бомбы основан на быстром протекании реакций ядерного расщепления некоторых веществ с выделением огромного количества энергии. К числу таких веществ принадлежит изотоп урана с атомным весом 235 и недавно открытый элемент плутоний. Ядерная реакция в этих элементах развивается со взрывным эффектом в том случае, если масса вещества достигает определенной критической величины. В атомной бомбе в нужный момент два заряда вещества, масса каждого из которых меньше критической, очень быстро и плотно соединяются, причем суммарная масса становится больше критической. Благодаря этому создаются условия для самопроизвольного возникновения реакции внутриядерного расщепления, происходящего со взрывом. Следовательно, количество «ядерного горючего» в атомных бомбах ограничено верхним и нижним пределами.

Первые атомные бомбы по мощности сравнивали с зарядом тротила весом 20 тыс. *т*. Дальнейшие изыскания привели к усовершен-

ствованию атомных бомб, а затем к созданию сверхмощных так называемых водородных бомб.

При взрыве водородной бомбы происходит соединение ядер двух изотопов водорода с превращением их в ядра гелия. В противоположность атомной бомбе мощность водородной бомбы не ограничена верхним пределом. По мощности водородная бомба может в десятки, сотни и тысячи раз превосходить атомную.

При взрыве атомной и водородной бомб образуются мощные взрывные волны за счет быстрого расширения воздуха, нагретого до высокой температуры в зоне взрыва.

Источником взрывов большой силы иногда является кинетическая энергия движущихся тел. Так, кинетическая энергия тела весом 1 *кг*, движущегося со скоростью 4 *км/сек*, составляет около 820 000 *кгм*. Если вся эта энергия очень быстро превратится в тепловую, то выделится 1900 *ккал* тепла, т. е. больше, чем при взрыве 1 *кг* ВВ.

При падении метеоритов на землю кинетическая энергия последних переходит в тепло, количества которого достаточно для превращения части вещества в нагретый сжатый газ, расширяющийся затем с взрывным эффектом.

При падении крупного метеорита (весом несколько *т*) со скоростью 50 *км/сек* эффект взрыва при ударе о землю может превысить эффект взрыва атомной бомбы.

Тепловая энергия сжатых газов или жидких и твердых веществ, способных к испарению, при определенных условиях очень быстро, со взрывом, превращается в механическую работу. Так, в угольных шахтах применяли основанные на этом принципе патроны кардокс и гидрокс. В первом случае используется быстрое превращение жидкой углекислоты, введенной в шпур в особом патроне, в углекислый газ, причем этот переход происходит за счет сообщения жидкой углекислоте необходимого количества тепла путем сжигания помещенной в том же патроне особой воспламенительной смеси. Во втором случае в аналогичных условиях используется быстрое превращение воды в пар.

К разряду тепловых взрывов следует отнести происходящие в природе вулканические извержения. Землетрясение является также взрывом, но в отличие от описанных разновидностей этот взрыв происходит без участия газов. Вследствие сложных геофизических процессов в земной коре возникают гигантские напряжения. В результате внезапного разрушения связей в больших объемах земной коры образуются сейсмические волны, распространение которых приводит к катастрофическим последствиям.

В развитии производительных сил человеческого общества большую роль сыграло использование химического взрыва.

Химическим взрывом называют крайне быстрое самораспространяющееся химическое превращение некоторых веществ или смесей с выделением тепла и образованием газообразных продуктов.

Соответственно взрывчатыми веществами называют вещества, способные к крайне быстрому самораспространяющемуся химическому превращению с выделением тепла и образованием газообразных продуктов.

Газообразные продукты взрывчатого превращения, нагретые теплом реакции, стремясь к расширению, способны производить работу и образовывать в окружающей среде ударные волны.

Начавшаяся в одном конце заряда взрывчатого вещества химическая реакция распространяется по нему со скоростью нескольких тысяч метров в секунду. За это время вещество в заряде полностью превращается в газообразные продукты, в результате чего в объеме заряда создается огромное давление.

Насколько объем газообразных продуктов взрывчатого превращения превосходит начальный объем ВВ, в котором они образуются в момент взрыва, можно представить, если подсчитать или измерить объем газов, образующихся из единицы объема ВВ. Из 1 *кг* аммонита № 6, занимающего при плотности 1 *г/см*^{3} объем, равный 1 *л*, при взрыве образуется 890 *л* газообразных продуктов (V_0), включая водяные пары. Указанный объем газообразных продуктов приведен условно к температуре 0°. Но при взрыве 1 *кг* аммонита выделяется около 990 *ккал* тепла, которое нагревает газы до 2600°. Известно, что при нагревании на 1° газ расширяется на $^1/_{273}$ своего объема. Поэтому нетрудно подсчитать объем (V) газообразных продуктов разложения 1 *кг* аммонита при температуре 2600° без совершения работы:

$$V = V_0 + V_0 \frac{t}{273} = 890 + 890 \frac{2600}{273} \cong 9367 \text{ } л.$$

Так как указанное количество газа в момент образования заключено в объем 1 *л*, то соответственно этому давление должно быть очень большим.

Расширение газообразных продуктов при высоком перепаде давления имеет характер удара, способного разрушить прочные преграды.

Скорость выделения энергии при взрыве настолько огромна, что если бы она могла превратиться за это время в работу, то развиваемая взрывом сосредоточенного (например, кубической формы) заряда аммонита весом 1 *кг* мощность измерялась бы миллионами лошадиных сил.

Это нетрудно видеть из такого расчета. Теплота взрыва 1 *кг* аммонита № 6, как уже упоминалось выше, составляет 990 *ккал*, что эквивалентно 422 500 *кгм* (механический эквивалент тепла 427 *кгм/кал*). Примем, что скорость выделения энергии соответствует скорости распространения взрывчатого разложения по заряду, длину которого будем считать равной 0,1 *м*. Скорость распространения взрывчатого разложения в аммоните № 6 при плотности 1 *г/см*^{3} в заряде принятой конфигурации равна приблизительно 4000 *м/сек*. Таким образом, заряд длиной 0,1 *м* должен разложиться за время $\frac{0,1}{4000} = 0,000025$ сек. Отсюда развиваемая мощность равна $\frac{422500}{0,000025}$ *кгм/сек*, что в переводе на лошадиные силы составит: $\frac{422500}{0,000025 \cdot 75} = 225\,000\,000$ *л. с.*

Следует оговориться, что практически работа расширения газа совершается после разложения ВВ и поэтому при расчете мощности

ВВ следовало бы брать не скорость взрывчатого превращения, а время расширения газа в процессе совершения им основной части работы. Это время трудно учесть, но современная скоростная фото-

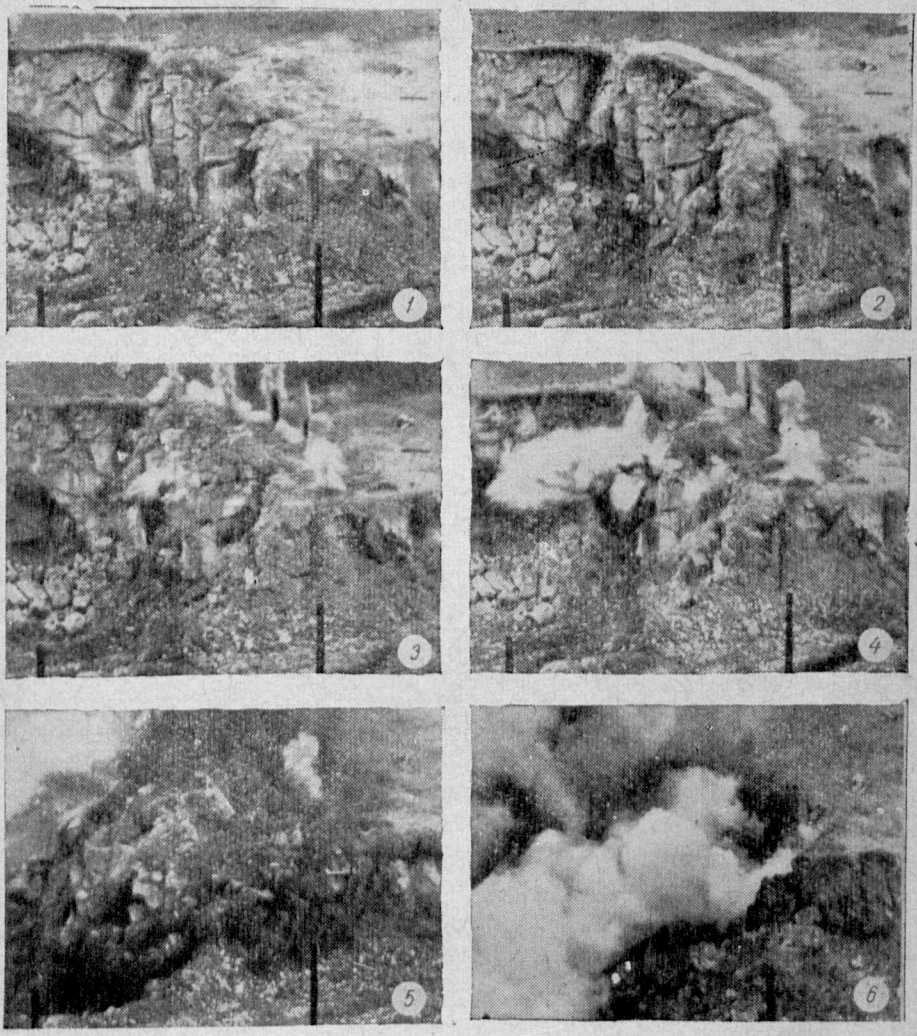


Рис. 1. Кадры киносъемки взрыва серии скважин на карьере: *1* — уступ до взрыва; *2*—взрыв детонирующего шнура; *3*—через 6 *мсек* с момента взрыва наблюдается выброс забоечного материала из скважин, прорыв газа по трещинам в грунте, начало движения породы; *4*—через 190 *мсек* наблюдается дальнейшее разрушение массива; *5*—через 1 сек. происходит разброс породы; *6* — через 3 сек. наблюдается смешение продуктов взрыва с атмосферой

съемка процессов взрыва (рис. 1) позволяет оценить это время миллисекундами (тысячная доля секунды).

Если энергию взрыва 1 *кг* аммонита отнесем ко времени 10 миллисекунд, то получим мощность более 0,5 млн. *л. с.*

Таким образом, главным преимуществом ВВ перед другими источниками химической энергии является большая скорость выделения энергии.

Реакции, протекающие при взрыве, по-существу сходны с химическими реакциями, которые происходят в процессах горения. В основном это окисление углерода и водорода с образованием углекислого газа и воды. Известно, что обычные горючие вещества, например уголь, будучи распылены в воздухе, способны взрываться с большой силой. Такие взрывы происходят иногда в угольных шахтах. Бывали случаи взрывов пыли на мукомольных мельницах.

В чем же причина того, что уголь, медленно горящий в печи, дает взрыв при распылении его в воздухе?

Причина заключается в том, что при распылении угля в воздухе реагирующая поверхность угольной пыли развита в значительно большей степени, чем поверхность кускового угля. Измельчение куска угля размером 10 *см* до частиц в одну тысячную долю сантиметра увеличивает поверхность, соприкасающуюся с воздухом, в 10 000 раз. Естественно, что при этом соответственно увеличению реагирующей поверхности должна увеличиться и скорость сгорания угля.

Скорость химических реакций зависит от температуры и давления. Если температуру реакции повысить всего на 10°, то скорость реакции возрастет в два-четыре раза. Это значит, что при переходе от комнатной температуры к температуре в 1000° скорость реакции может возрасти во много миллионов раз.

Зависимость скорости реакции от давления может быть значительной. Для некоторых реакций скорость пропорциональна давлению, а иногда она пропорциональна квадрату давления. При такой зависимости повышение давления от 1 до 1000 *атм* может обусловить повышение скорости реакции в миллион раз.

Если выделяющееся в результате химической реакции тепло не успевает отводиться из зоны реакции и затруднен отвод газообразных продуктов химической реакции, то могут быть созданы условия для колоссального повышения температуры и давления в зоне химической реакции и ускорения ее до взрыва. При воспламенении угольной пыли в воздухе в силу большой реагирующей поверхности тепло реакции не успевает отводиться из зоны реакции и возрастание скорости реакции приводит к взрыву.

Известно, что взрывчатые вещества, способные к химическим реакциям без участия кислорода воздуха, могут не только взрываться, но и гореть. Тротиловые шашки или патроны аммонита можно поджечь и они будут сгорать медленно и спокойно. Тротиловая шашка высотой 10 *см* при поджигании ее с торца сгорает за 15 минут.

При поджигании тротиловой шашки мы в какой-то ее части создаем условия для самопроизвольного течения химической реакции с выделением тепла. Если при этом отвод тепла в окружающую атмосферу не слишком велик, то горение не затухает и может установиться равновесие между теплоприходом и теплоотводом в окру-

жающую среду. Горение в этом случае будет идти с определенной скоростью и устойчиво. Но достаточно поместить заряд тротила в стальную оболочку и затруднить этим отвод газообразных продуктов горения, уносящих с собой тепло в окружающую атмосферу, как становится возможным ускорение химической реакции горения до взрыва, чему способствует также повышение давления.

При очень сильном механическом ударе вследствие разогрева даже в открытом заряде ВВ в какой-то небольшой его части может возникнуть очень бурно протекающая реакция, при которой газообразные продукты не смогут быстро отводиться из зоны реакции, а возрастающее давление обусловит ускорение реакции до взрыва.

В процессе горения тепло от горящего слоя ВВ передается еще не затронутым реакцией слоям вещества путем теплопроводности (в твердых веществах) или диффузии (в газах). Эти процессы протекают сравнительно медленно, поэтому и само горение идет с небольшой скоростью.

В случае значительного ускорения химической реакции газообразные продукты, возникающие в зоне реакции и нагретые теплом реакции, в начальный момент находятся под высоким давлением. При своем расширении они производят удар по впереди лежащим слоям ВВ. Под влиянием этого удара взрывчатое вещество и воздух, заключенный между частицами ВВ, сжимаются, в результате чего при достаточной силе удара повышается температура и возникает реакция в частях заряда, подвергающихся удару. Таким образом, сжатие, являющееся следствием разложения ВВ, в свою очередь является причиной возникновения химической реакции во впереди лежащих слоях взрывчатого вещества.

Скорость движения волны сжатия по веществу значительно больше скорости передачи энергии путем теплопроводности, что коренным образом отличает взрыв от горения.

ГЛАВА II

КЛАССИФИКАЦИЯ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ

Известно очень большое количество химических веществ и смесей, способных к самораспространяющемуся взрывчатому разложению. Однако далеко не все они могут быть использованы в качестве ВВ. Так, значительное количество веществ, способных взрываться, обладает малой химической стойкостью, слишком чувствительны к механическому или тепловому воздействию и, следовательно, могут легко взрываться, когда это не требуется.

Практическое распространение получают взрывчатые вещества, достаточно безопасные в обращении, эффективные в применении, технически и экономически доступные в изготовлении.

По своему физическому состоянию взрывчатые вещества могут быть твердые (монолитные или сыпучие), пластичные, жидкие и газообразные.

Примером твердых из числа наиболее известных и широко применяемых ВВ являются тротил, дымный порох и аммониты. Из жидких ВВ практическое применение находят нитроглицерин, нитрогликоль и некоторые жидкие смеси.

Газообразные взрывчатые смеси, например, метано-воздушную и водородо-воздушную можно обнаружить в атмосфере горных выработок под землей. Эти смеси образуются в результате выделения соответствующих газов из угля, либо других ископаемых и представляют большую опасность при ведении взрывных работ.

В качестве ВВ газообразные смеси не получили практического применения вследствие малой энергии, приходящейся на единицу объема, и неудобства в обращении.

Некоторые твердые или сыпучие вещества содержат примеси жидких ВВ. В качестве примера можно назвать предохранительные «победиты», содержащие небольшое количество жидкого нитроглицерина.

Смесью твердых и жидких компонентов являются оксиликвиты, содержащие жидкий кислород.

Пластичные динамиты по своей физической структуре занимают своеобразное промежуточное положение между твердыми и жидкими веществами.

По составу взрывчатые вещества можно подразделить на две основные группы: химические соединения и механические смеси.

В первую группу входят различные химические соединения, взрывчатые свойства которых определяются наличием в молекуле этих веществ особых групп атомов, обусловливающих термодинамическую неустойчивость молекул вещества и способность их перегруппировываться в более стойкие соединения. Такие группы атомов под влиянием тепла способны отщепляться, что обусловливает возможность протекания процессов окисления. В результате этих реакций, идущих при взрыве с большими скоростями, углерод и водород, содержащиеся в молекуле ВВ, окисляются кислородом, входящим в состав той же молекулы, с выделением значительного количества тепла.

В группу химических соединений входят следующие важнейшие классы взрывчатых веществ:

а) нитросоединения — органические соединения, содержащие одну или несколько нитрогрупп (NO_2); к числу наиболее известных ВВ этого типа принадлежат тринитротолуол или тротил, тринитрофенилметилнитрамин или тетрил и гексоген;

б) эфиры азотной кислоты — органические соединения, содержащие одну или несколько групп ONO_2; к этой группе взрывчатых веществ относятся эфиры спиртов, например, нитроглицерин, нитрогликоль и тетранитропентаэритрит (тэн);

в) гремучая кислота и ее соли (гремучая ртуть);

г) азотисто-водородная кислота и ее соли (азид свинца).

Кроме перечисленных, известны классы взрывчатых веществ с другими характерными группами атомов в молекулах, имеющие, однако, меньшее практическое применение.

Ко второй группе ВВ, представляющих собой механические смеси нескольких компонентов (смесевые ВВ), относятся по существу все ВВ, находящие применение в практике гражданских взрывных работ.

Взрывчатые смеси имеют в своем составе чаще всего компонент, относительно богатый кислородом, и компоненты, сгорающие частично или полностью за счет кислорода первого компонента. В числе последних могут быть невзрывчатые горючие вещества (парафин, древесная мука) или взрывчатые вещества, содержащие недостаточное количество кислорода для полного окисления углерода и водорода, входящих в их состав.

Из числа ВВ смесевого типа наибольшее значение в практике взрывных работ получили две группы веществ: аммиачно-селитренные ВВ (аммониты, аммоналы, динамоны) и динамиты.

Главными составными частями аммиачно-селитренных ВВ являются аммиачная селитра, взрывчатые нитросоединения (обычно тротил или динитронафталин) и горючие невзрывчатые вещества.

Динамиты представляют собой смесь жидких нитроэфиров с твердыми компонентами — с калиевой или аммиачной селитрой, с древесной мукой и нитроклетчаткой.

В некоторых странах находят применение хлоратные и перхлоратные ВВ. В отличие от аммиачно-селитренных ВВ главным компонентом—окислителем в этих смесях является хлорат калия (бертолетовая соль) или перхлораты аммония и калия.

Взрывчатые вещества целесообразно также классифицировать по характеру действия при использовании. По такому признаку взрывчатые вещества можно подразделить на детонирующие ВВ и пороха.

Основной формой работы детонирующих ВВ является дробление, поэтому такие ВВ называют еще дробящими, или бризантными, а основной формой работы порохов является их метательное действие, благодаря чему их используют главным образом в артиллерии; в горном деле дымные пороха находят применение при добывании штучного камня.

Следует заметить, что в определенных условиях бездымные пороха могут детонировать, поэтому их иногда применяют для взрывных работ так же, как и детонирующие ВВ.

Детонирующие ВВ по их назначению в свою очередь подразделяют на инициирующие, или первичные ВВ (гремучая ртуть, азид свинца), и на бризантные, или вторичные ВВ.

При ведении взрывных работ основной заряд составляют из бризантного взрывчатого вещества, а для возбуждения взрыва вторичных ВВ применяют небольшие заряды инициирующих ВВ, снаряженных в капсюли-детонаторы.

Подгруппа бризантных детонирующих ВВ включает в себя все основные виды ВВ, применяемых для взрывных работ и для снаряжения боеприпасов.

По области применения из этой подгруппы целесообразно выделить промышленные взрывчатые вещества.

Классификация промышленных ВВ (аммиачно-селитренных и нитроглицериновых) по свойствам и условиям безопасного применения приводится ниже, в соответствующих разделах.

ГЛАВА III

НАЧАЛЬНЫЙ ИМПУЛЬС

Чтобы вызвать взрывчатое разложение вещества, способного к быстрой самораспространяющейся реакции с выделением тепла и с образованием газообразных продуктов, необходимо тем или иным внешним воздействием сообщить этому веществу некоторое количество энергии, достаточное для возбуждения реакции.

Интенсивность воздействия, или, как говорят, величина минимального начального импульса, необходимого для возбуждения реакции взрывчатого разложения, для разных взрывчатых веществ может быть различной и зависит от их чувствительности к тому или иному виду импульса.

Известны взрывчатые вещества, крайне чувствительные к любым воздействиям. Иодистый азот, например, взрывается от самого легкого прикосновения к нему. Такие ВВ, естественно, не могут найти практического применения.

Из числа применяющихся ВВ наиболее чувствительными являются инициирующие.

Бризантные ВВ, обычно превосходящие по взрывному действию инициирующие, являются по сравнению с последними более устойчивыми к внешним воздействиям и более безопасными в обращении. К числу таких веществ в первую очередь следует отнести тротил.

При определенных условиях даже такое относительно чувствительное бризантное вещество как нитроглицерин может неограниченно долго сохраняться, не претерпевая существенного химического превращения.

В качестве примера можно привести такой интересный факт. В лаборатории динамитной фабрики в Авильяне близ Турина (Италия) уже более 100 лет хранится в склянке под водой 300 *г* нитроглицерина, изготовленного итальянским ученым Асканио Собреро.

В чем же заключается причина различной устойчивости взрывчатых веществ к внешнему воздействию при их общей способности бурно превращаться в другие продукты с высвобождением значительного количества энергии?

Для ответа на этот вопрос следует кратко остановиться на том, какие условия необходимы для протекания химического превращения.

Молекулы всех веществ находятся в постоянном движении, тем более интенсивном, чем выше температура. При движении происходит столкновение молекул. Именно эти столкновения и являются необходимым условием возникновения химического распада или взаимодействия молекул вещества.

Но далеко не все движущиеся молекулы обладают энергией, достаточной для того, чтобы при столкновении произошла химическая реакция. Как показал знаменитый шведский физико-химик Аррениус, химическое взаимодействие молекул возможно при столкновении только лишь «активных молекул», т. е. таких молекул, которые обладают запасом энергии, обеспечивающим возможность протекания реакции.

Энергия единичных активных молекул, существующих даже при низкой температуре, вследствие большого числа столкновений с неактивными молекулами рассеивается и поэтому не может вызвать самораспространяющуюся реакцию в массе взрывчатого вещества. Для того, чтобы реакция стала возможной, необходимо увеличить число активных молекул.

Повысить число активных молекул проще всего нагреванием вещества до более высокой температуры.

Нагревание вещества непосредственное или путем механического воздействия, а также действием взрыва другого заряда вызывает увеличение числа реагирующих молекул в том или ином объеме вещества до такого количества, которое обеспечивает возникновение химической реакции во взрывчатом веществе и ее самораспространение.

ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ВВ К ТЕПЛОВОМУ ИМПУЛЬСУ

Изучение чувствительности ВВ к тепловому воздействию имеет большое практическое значение, так как в процессе производства и применения взрывчатые вещества часто подвергаются действию повышенной температуры. В большинстве случаев необходимо, чтобы ВВ были возможно более устойчивы к действию тепла. Лишь для инициирующих ВВ и порохов бывает желательной достаточно высокая восприимчивость к тепловому воздействию.

Возбуждение взрыва нагреванием в основном сводится к следующему. При местном разогреве вещества некоторая его часть начинает разлагаться с выделением энергии. Если скорость выделения тепла в результате начавшейся химической реакции будет превышать скорость отвода тепла из зоны реакции вследствие теплопроводности и испарения вещества, то температура в массе вещества будет повышаться и реакция ускорится вплоть до возникновения вспышки.

Для осуществления этого условия необходимо температуру повысить до какого-то уровня, причем вспышка вещества при воздействии на него определенной температуры происходит не сразу.

Температура вспышки. Та минимальная температура, при которой в течение условно заданного отрезка времени теплоприход становится больше теплоотвода и химическая реакция вследствие самоускорения принимает характер взрывчатого превращения, называется температурой вспышки.

Температура вспышки зависит от условий испытания ВВ—величины навески, конструкции прибора и скорости нагрева, поэтому условия испытания должны быть строго регламентированы.

При нагревании в массе ВВ в результате медленно идущих реакций часто образуются нестойкие промежуточные продукты, накопление которых приводит к резкому ускорению реакции и возникновению вспышки.

Промежуток времени от начала нагревания при заданной температуре до момента возникновения вспышки называют периодом задержки вспышки. Задержка вспышки бывает тем меньше, чем выше температура, действию которой подвергается вещество.

Для определения температуры вспышки, характеризующей чувствительность ВВ к нагреву, используют прибор, изображенный на рис. 2.

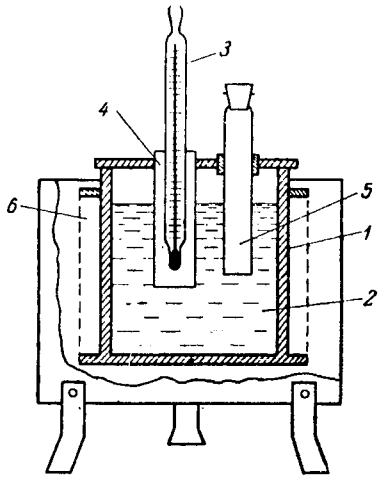


Рис. 2. Прибор для определения температуры вспышки

Баню *1*, имеющую электрический обогрев, обычно заполняют металлическим сплавом Вуда *2* с температурой плавления 65° или парафином. Сплав содержит 15 весовых частей висмута, 8 частей свинца, 4 части олова и 3 части кадмия. Температуру бани контролируют термометром *3*, установленным в бане в специальной гильзе *4*, что дает возможность определять температуру сплава в таких же условиях, в каких она воздействует и на навеску взрывчатого вещества.

Для испытания навеску ВВ 0,05 *г* помещают в гильзу *5*, не плотно закрываемую пробкой. Сплав в бане разогревают с помощью обмотки электронагревателя *6* до предполагаемой температуры вспышки испытуемого ВВ. Гильзу с навеской помещают в разогретую баню и одновременно включают секундомер для определения времени, в течение которого произойдет вспышка ВВ.

Изменяя температуру бани, определяют для каждого ВВ ряд температурных точек, характеризующихся временем задержки вспышки от 0 сек. до требуемого предела.

В качестве наиболее характерной принимают минимальную температуру, при которой вспышка происходит через 5 мин. после помещения ВВ в нагретую баню.

468/12

Температуры вспышки наиболее широко применяющихся ВВ приведены ниже.

Наименование ВВ	Температура вспышки, град.
Тротил	285—295
Тетрил	195—200
Тэн	215
Гексоген	230
Аммонит № 6	280—320
Гремучая ртуть	175—180
Азид свинца	330—340

Более полно чувствительность ВВ к нагреву характеризуют кривой, показывающей зависимость температуры вспышки от времени выдержки (рис. 3).

В практических условиях приготовления и применения ВВ иногда основное значение имеет знание той части кривой, которая характеризует температуры вспышки ВВ при больших задержках.

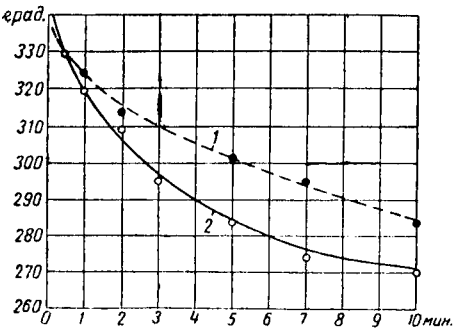


Рис. 3. Кривые зависимости температуры вспышки ВВ от времени выдержки: *1* — пикриновая кислота; *2* — тротил

Величины температур вспышек дают представления о возможных температурных пределах безопасного обращения с ВВ. Однако следует иметь в виду, что при длительном температурном воздействии вспышки могут происходить при значительно более низкой температуре, особенно если имеются условия для местного накопления тепла.

В то же время, учитывая наличие задержки вспышек при действии даже высокой температуры, можно пользоваться ВВ для взрывания массивов, имеющих температуру, близкую к температуре вспышки ВВ. При правильной организации взрывных работ с помощью ВВ взрывают не полностью остывшие козлы в доменных печах и отвалы горячего шлака. Применяют ВВ для торпедирования нефтяных скважин на глубине, где температура превышает 150°.

Температура вспышки не характеризует легкости воспламенения вещества при воздействии пламени или искр. Дымный порох, имеющий температуру вспышки 290—310°, воспламеняется легче бездымного пороха, температура вспышки которого 180—200°. Поэтому очень важными являются характеристики воспламеняемости ВВ.

Чувствительность к огню (воспламеняемость). При использовании ВВ на взрывных работах очень часто существует опасность воздействия на них луча огня огнепроводного шнура. Поэтому промышленные ВВ испытывают на воспламеняемость от луча огня огнепроводного шнура.

Для этого 1 *г* ВВ *1* (рис. 4) помещают в пробирку *2*, укреплен-

ную на штативе *3*. В пробирку вводят конец огнепроводного шнура *4* таким образом, чтобы он находился на расстоянии 1 *см* от ВВ. При сгорании шнура луч пламени, воздействуя на ВВ, может вызвать его воспламенение.

На взрывных работах применяют только те ВВ, которые в шести параллельных опытах не дают ни одной вспышки, загорания или взрыва.

Не выдерживающие такого испытания ВВ, например порох, используют на взрывных работах только в исключительных случаях. При этом обязательно разрабатывают специальные инструкции по безопасному обращению с ВВ для конкретных местных условий.

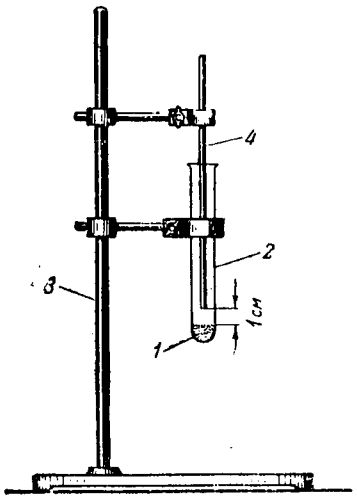


Рис. 4. Испытание ВВ на чувствительность к лучу огня

ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ВВ К МЕХАНИЧЕСКИМ ВОЗДЕЙСТВИЯМ

Основными формами механического воздействия на ВВ могут быть удар или трение, при которых всегда наблюдается разогрев вещества, подвергающегося механическому воздействию.

Химическое разложение ВВ под действием тепла, выделяющегося при ударе или трении, может возникнуть лишь в том случае, если энергия механического воздействия обеспечит повышение температуры до такого уровня, который необходим для почти мгновенного воспламенения вещества.

Чувствительность ВВ к удару. Наиболее достоверной гипотезой о механизме возникновения взрыва при ударе в настоящее время считается тепловая.

Тепло, выделяющееся при ударе, не может разогреть всю массу вещества до высокой температуры. Но энергией удара можно нагреть отдельные небольшие локальные участки в массе ВВ до температуры его воспламенения.

Образование локальных разогревов («горячих точек») при ударе, согласно этой гипотезе, происходит вследствие адиабатического сжатия пузырьков газа, имеющихся в ВВ в виде включений или в результате трения.

Вблизи горячих точек за время удара успевает произойти химическая реакция разложения ВВ. Выделяющейся при этом энергии может оказаться достаточно для возбуждения взрывчатого превращения новых участков ВВ с последующим распространением процесса на всю навеску.

Некоторые исследователи предполагают, что механическое воз-

действие может привести к непосредственному сближению части молекул вещества, обеспечивающему возникновение химической реакции. Однако достаточного обоснования эта гипотеза не имеет.

Сравнительные характеристики чувствительности к удару различных ВВ зависят от условий испытания. Некоторые ВВ оказываются чувствительнее других, воспринимая удар в замкнутом пространстве, т. е. когда они подвергаются действию удара, не имея возможности свободно вытекать из-под бойка ударника. Другие могут оказаться чувствительнее в том случае, если при ударе вещество может выдавливаться из-под бойка.

Существует ряд факторов, от которых зависит чувствительность ВВ к удару.

К числу таких факторов можно отнести физическое состояние, температуру и плотность вещества, а также наличие тех или иных примесей в нем.

Как правило, с повышением температуры взрывчатого вещества чувствительность его к удару возрастает. Это положение может быть проиллюстрировано следующим опытом. Заряды аммиачной селитры с примесью мазута (3%) и песка (5%), в середину которых помещали стальные пластины, не взрывались от прострела пулей при обычной температуре, но взрывались в этих же условиях при предварительном подогреве зарядов до 60°.

Увеличение плотности взрывчатых веществ обычно снижает их чувствительность к удару. Понижает чувствительность ВВ к удару также и их желатинирование (см. гл. 17). Так, например, минимальная высота падения груза, от удара которого взрывается нитроглицерин, желатинированный 3% коллодионного хлопка, в три раза больше высоты падения груза, от удара которого взрывается чистый нитроглицерин.

В некоторых случаях наблюдается зависимость чувствительности ВВ к удару от величины их кристаллов. Особенно это заметно у инициирующих ВВ, у которых с увеличением размера кристаллов чувствительность возрастает.

В большой степени чувствительность взрывчатых веществ можно изменить, вводя в них некоторые примеси, которые по характеру влияния разделяют на две группы — повышающие и понижающие чувствительность ВВ. Вещества первой группы называют *сенсибилизаторами*, а процесс введения таких веществ в ВВ — *сенсибилизацией*.

Во вторую группу входят примеси, способствующие понижению чувствительности. Такие примеси называют *флегматизаторами*, а понижение чувствительности ВВ путем их введения *флегматизацией*.

Установлено, что инертные вещества, твердость и температура плавления которых выше твердости и температуры плавления данного ВВ, являются обычно сенсибилизаторами по отношению к этому ВВ. Вещества, имеющие меньшую твердость и температуру плавления, чем у данного ВВ, могут его флегматизировать. В отдельных случаях одно и то же вещество может быть по отношению к

одним взрывчатым веществам флегматизатором, а по отношению к другим — сенсибилизатором. Так, например, в одинаковых условиях испытания введение 60% талька в тротил повышает процент взрывов его при ударе с 4 до 75%, а процент взрыва гексогена при введении 60% талька снижается с 78 до 6%.

В практике работ чаще всего можно встретиться с такими сенсибилизаторами, как песок, мелкие куски породы, металлические стружки, мелкие осколки стекла и прочие засоряющие ВВ материалы. Тротил, дающий в чистом виде при испытании чувствительности к удару 4—12% взрывов, при введении в него 0,25% песка дает 29%, а при введении 5% песка — 100% взрывов. Еще более резко сказывается сенсибилизирующее влияние малых количеств твердых примесей на чувствительности таких ВВ, как тетрил, тэн, гексоген и другие.

Учитывая сенсибилизирующее действие твердых примесей, к ВВ обычно предъявляют строгие требования в отношении их чистоты и минимального содержания нерастворимых примесей и кремнезема. Для всех выпускаемых промышленностью ВВ эти показатели строго регламентированы. В отдельных случаях для повышения чувствительности ВВ к наколу жалом или удару бойка оружия в них вводят такие сенсибилизаторы, как толченое стекло, песок и др.

Сенсибилизирующее влияние примесей объясняют тем, что включение твердых веществ в ВВ способствует при ударе концентрации энергии на твердых частицах и их острых гранях и облегчает условия создания локальных горячих очагов.

Наличие в составе ВВ инертных примесей с низкой температурой плавления способствует уменьшению чувствительности ВВ, так как значительная часть энергии удара в этом случае расходуется на плавление легкоплавкой примеси.

Вещества с твердостью, меньшей твердости частиц ВВ, смягчают удар, создают возможность свободного движения частиц ВВ и тем самым снижают вероятность концентрации энергии в отдельных точках.

В качестве флегматизаторов обычно используют легкоплавкие вещества, маслянистые жидкости, обладающие хорошей обволакивающей способностью, высокими теплоемкостью и температурой вспышки и не взаимодействующие с ВВ. Для флегматизации высокочувствительных и опасных в чистом виде взрывчатых веществ применяют вазелин, парафин, церезин, различные масла и другие подобные вещества. Флегматизатором взрывчатых веществ является также вода.

Увлажнением пользуются при перевозках или хранении высокочувствительного, опасного в обращении пироксилина, который в сухом виде взрывается от удара груза весом 2 *кг* при падении его с высоты 20 *см*. При содержании 15% воды пироксилин взрывается от падения того же груза с высоты 90—95 *см*, а при содержании 20% влаги лишь при падении с высоты более 180 *см*.

Определение чувствительности взрывчатых веществ к удару производят на копре (рис. 5). Испытание заключается в том, что на

навеску ВВ (0,05 *г*), заключенную в специальный приборчик *1*, сбрасывают с некоторой высоты (до 3 *м*) груз *2* определенного веса (от 2 до 10 *кг*).

Применяют две конструкции штемпельных приборчиков. Для стандартных испытаний используют приборчик № 1, изображенный на рис. 6,*а*.

Н. А. Холево предложил несколько видоизмененный штемпельный приборчик № 2 (рис. 6,*б*). В приборчике № 2 в отличие от приборчика № 1 имеется кольцеобразная выемка, в которую при ударе вытекает ВВ. Для более детального исследования чувствительности ВВ к удару следует проводить испытание в приборчиках обоих типов.

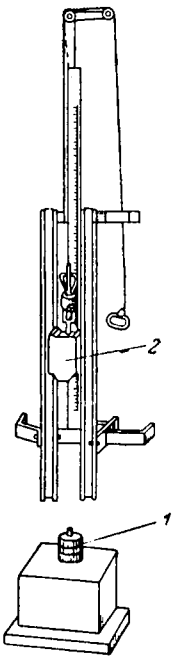


Рис. 5. Копер для определения чувствительности ВВ к удару

В некоторых случаях испытания производят без штемпельных приборчиков на больших копрах с грузом до 25 *кг*.

Существует несколько методов оценки чувствительности ВВ к удару. Наибольшее распространение в последнее время получил метод, по которому определяют процент взрывов из 25, 50 или 100 испытаний при падении груза весом 10 *кг* с высоты 25 *см*.

Ниже приводится чувствительность к удару некоторых вторичных ВВ, определенная указанным методом.

Наименование взрывчатых веществ	Процент взрывов из 100 испытаний
Тротил	4 — 12
Аммонит № 6	16 — 32
Тетрил	50 — 60
Гексоген	70 — 80
Тэн	100
Динамит 62-процентный	100

Более полно чувствительность ВВ к удару можно характеризовать по кривой чувствительности (рис. 7), построенной на основании данных о проценте взрывов при падении груза с разной высоты.

По этому графику можно установить нижний и верхний пределы чувствительности ВВ, а также определить высоту падения груза, соответствующую 50% взрывов.

Наряду с описанными методами в литературе очень часто встречается характеристика чувствительности ВВ к удару по высоте падения груза определенного веса. В этом случае устанавливают ту максимальную высоту, при которой еще не происходит взрыва ни у одной из шести навесок ВВ. Такой способ оценки чувствительности ВВ к удару следует считать менее точным.

Для специальных исследований применяют метод вычисления энергии удара на единицу поверхности испытываемого ВВ, необходимой для получения определенного процента взрывов (10, 50, 100%). Холево считает более правильным при таком методе оценки чувствительности ВВ пользоваться не энергией удара, а энергией, поглощаемой ВВ при ударе (т. е. учитывать упругие свойства штемпельных приборчиков и навески ВВ).

Определение чувствительности инициирующих ВВ к удару производят на копрах небольших размеров с грузом от 0,5 до 1,8 *кг*. Результаты испытания на копре не могут объективно характеризовать степень опасности обращения с ВВ, обладающими повышен-

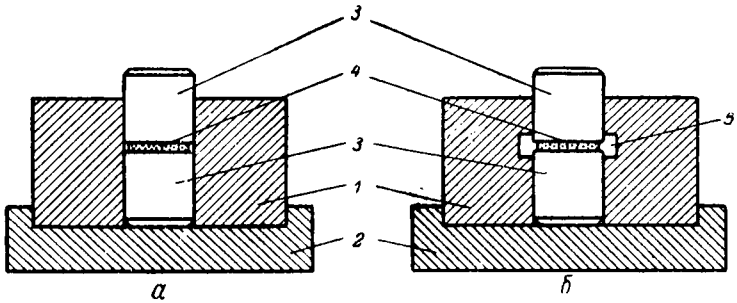


Рис. 6. Штемпельный приборчик: *а* — стандартный; *б* — предложенный Холево; *1* — муфта; *2* — поддон; *3* — стальные цилиндрики; *4* — навеска ВВ; *5* — канавка

ной чувствительностью к удару, но вместе с тем пониженной восприимчивостью к инициированию взрывом.

В качестве примера можно привести результаты сравнительных испытаний на чувствительность ВВ к удару и восприимчивость к капсюлю-детонатору тротила и аммиачной селитры с примесью некоторых инертных веществ, а также смеси тротилового масла с лигнином.

При падении груза весом 10 *кг* с высоты 900 *мм* чистая сухая аммиачная селитра дает примерно одинаковый процент взрывов с тротилом (8—12%), но если к селитре примешаны инертные сенсибилизаторы, например тонкодисперсная окись кремния в количестве 3%, то процент взрывов селитры при падении груза с упомянутой высоты возрастает до 48. Однако указанную смесь, обладающую столь высокой чувствительностью к удару, в противоположность тротилу, в обычных условиях взорвать с помощью капсюля-детонатора не удается.

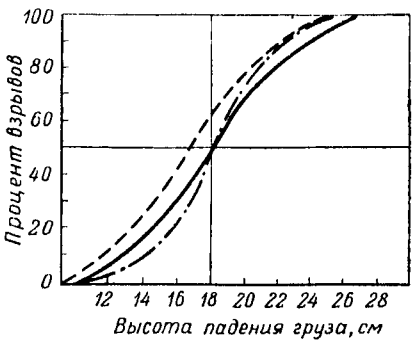


Рис. 7. Кривые чувствительности к удару различных ВВ

Такие же парадоксальные результаты получаются со смесью тротилового масла и лигнина. Смесь 66% тротилового масла с 44% лигнина при стандартных условиях испытания на копре по чувствительности близка к гексогену (80% взрывов), однако от капсюля-детонатора № 8 в открытых зарядах эта смесь не взрывается.

Следует считать, что испытания на копре характеризуют лишь вероятность возникновения при ударе локальных очагов взрывча-

того разложения и распространения этого разложения на объем вещества, подвергнувшийся сжатию и разогреву ударом в штемпельном приборчике. Можно предположить, что вероятность распространения взрывчатого разложения в заряде ВВ в условиях, когда основная масса его не подвергается сильному сжатию и разогреву ударом, определяется способностью вещества детонировать от того инициального импульса, который возникает при взрыве небольшого объема вещества, находящегося в зоне интенсивного механического воздействия.

Для более полной характеристики степени опасности обращения с тем или иным веществом целесообразно результаты испытания на копре дополнять испытаниями вещества на чувствительность к взрывному импульсу.

Испытания на чувствительность к инициальному импульсу следует производить, конечно, в строго определенных условиях при оптимальном для детонации состоянии вещества.

Чувствительность к трению. В практике взрывных работ взрывчатые вещества весьма редко подвергаются воздействию только трения. Чаще всего наблюдается так называемый скользящий или, как говорят, трущий удар.

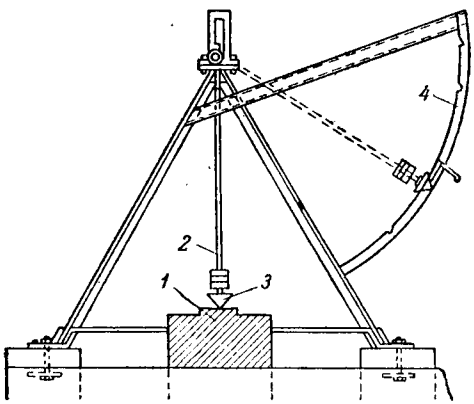


Рис. 8. Маятник для определения чувствительности к трению

Такое воздействие на ВВ осуществляется при определении чувствительности ВВ к трению на приборе, называемом фрикционным маятником (рис. 8). В этом приборе трущее усилие на навеску ВВ, помещенную в углубление на наковальне *1*, оказывает маятник *2*, на трущем конце которого имеется съемный стальной башмак *3* с грузом от 1 до 20 *кг*. В зависимости от чувствительности ВВ трущая поверхность может быть стальная, бронзовая, деревянная или из других материалов. Во время качания маятник проходит над наковальней и производит трущий удар по навеске ВВ. Чувствительность ВВ к трению характеризуют весом башмака маятника, высотой его падения, определяемой по шкале *4*, и количеством качаний до получения вспышки ВВ.

Другой разновидностью приборов для определения чувствительности ВВ к трению являются приборы, в которых трущее усилие создается вращающейся поверхностью (рис. 9). Мерой чувствительности ВВ к трению в таких приборах принимают нагрузку на вращающуюся поверхность, при которой происходит взрыв.

Для сравнительной оценки малочувствительных к трению ВВ иногда их испытывают при введении в состав вещества некоторого количества сенсибилизатора (песка, толченого стекла).

Определенной зависимости между чувствительностью ВВ к

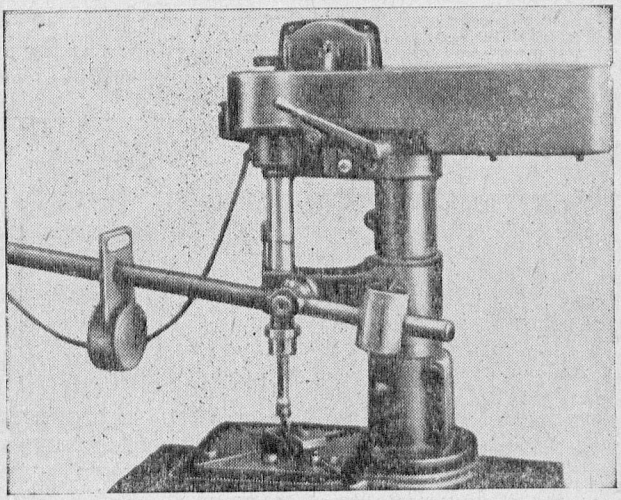


Рис. 9. Прибор для определения чувствительности ВВ к трению

трению и удару не установлено. Но, как правило, считают, что ВВ, наиболее чувствительные к удару, являются более чувствительными и к трению.

ВОСПРИИМЧИВОСТЬ ВВ К ВЗРЫВУ ДРУГОГО ВЗРЫВЧАТОГО ВЕЩЕСТВА

Чувствительность взрывчатого вещества к инициирующему действию взрыва другого ВВ называют восприимчивостью или чувствительностью к детонации.

Восприимчивость вторичных ВВ, а одновременно и инициирующее действие инициирующих ВВ, принято характеризовать так называемым предельным инициирующим зарядом, т. е. тем минимальным зарядом инициирующего ВВ, который необходим для возбуждения детонации вторичного ВВ.

Восприимчивость некоторых ВВ к инициированию приведена в табл. 1.

В последнее время установлено, что инициирующая способность и восприимчивость ВВ зависят не только от веса инициирующего заряда, но и от площади его соприкосновения с инициируемым ВВ. Увеличение площади соприкосновения инициирующего и возбуждаемого ВВ может создать лучшие условия для возникновения взрыва, даже при уменьшении веса инициирующего заряда.

Довольно часто при использовании вторичных ВВ с пониженной восприимчивостью или зарядов с повышенной плотностью инициирующее действие средств взрывания капсюля-детонатора или детонирующего шнура оказывается недостаточным. В этом случае применяют промежуточные детонаторы. Таблица 1

Восприимчивость некоторых вторичных ВВ, испытываемых в оболочке в замкнутом объеме, к инициированию

Наименование В В	Предельный инициирующий заряд, *г*	
	гремучая ртуть	азид свинца
Тротил	0,36	0,09
Тетрил	0,29	0,025
Аммонит №6	0.30	—
Динафталит	0.60	—
Антигризутный динафталит с 15% поваренной соли	1,00	—
Алюмит № 1	0,30	—

Промежуточные детонаторы могут быть изготовлены из любых вторичных взрывчатых веществ с хорошей восприимчивостью к действию стандартных средств взрывания. Например, промежуточным детонатором по отношению к литому тротилу, не взрывающемуся от взрыва капсюля-детонатора № 8, может быть порошкообразный тротил, а для взрыва сильно слежавшегося аммонита можно использовать тот же аммонит, но в разрыхленном состоянии.

Промежуточный детонатор подбирают опытным путем для каждого заряда маловосприимчивого ВВ. При этом величина промежуточного детонатора не зависит от величины взрываемого заряда. Если под действием взрыва заряда порошкообразного аммонита весом 200—300 *г* заряд слежавшегося аммонита весом 2—3 *кг* полностью детонирует, то такого же промежуточного детонатора достаточно и для взрыва большого заряда слежавшегося аммонита, величина которого может измеряться десятками и сотнями тонн.

Возбуждение взрыва большинства трудновзрываемых ВВ происходит тем надежнее, чем более мощное ВВ использовано в качестве промежуточного детонатора. Бездымный порох легче взорвать прессованной тротиловой шашкой, чем порошкообразным аммонитом, а заряды бездымного пороха, не взрывающегося от тротиловой шашки, взрывают гексогеновой или тэновой шашкой.

Однако у некоторых ВВ (главным образом смесевых с небольшой скоростью детонации) при диаметре заряда, близком к критическому, не удается вызвать детонацию при инициировании промежуточными детонаторами из мощных ВВ. Оказывается, что детонацию таких зарядов легче вызвать более слабыми импульсами, например взрывом заряда того же ВВ меньшей плотности или более тонкоизмельченного, либо зарядом того же ВВ, но большего диаметра. Такой способ инициирования А. Ф. Беляев назвал нормальным.

Для определения количества необходимого промежуточного детонатора может быть использован любой метод фиксации полноты детонации инициируемого заряда. Проще всего это достигается взрыванием зарядов достаточно большой длины, когда можно с уверенностью сказать, что вызванное промежуточным детонатором взрывчатое разложение не является затухающим. Надежной характеристикой полноты детонации может служить скорость детонации инициируемого заряда, если она замеряется на разных участках длины заряда.

В практике ведения взрывных работ бывают случаи неплотного прилегания патронов друг к другу при заряжании шпуров (рис. 10). Поэтому необходимо знать, на какое расстояние передается детонация от одного заряда к другому (взрыв через влияние).

Наиболее простым и легко выполнимым методом проверки восприимчивости заряда к взрыву другого заряда, помещенного на некотором расстоянии от первого, служит прямое определение того максимального расстояния, при котором происходит полный взрыв обоих зарядов. Причем практикой доказано, что (см. главу 6) чем больше это расстояние, тем выше восприимчивость ВВ.

Восприимчивость ВВ к взрыву другого взрывчатого вещества изменяется при изменении физических характеристик инициируемого ВВ. Наиболее ощутимое влияние оказывают физическая структура ВВ, его температура и плотность.

Как правило, желатинированные ВВ менее восприимчивы к детонации, чем порошкообразные. Увеличение степени измельчения ВВ повышает его восприимчивость, а понижение температуры, наоборот, уменьшает. Так, пироксилин и пикриновая кислота, взрывающиеся при нормальной температуре (15—20°) от действия 0,25 *г* гремучей ртути, после охлаждения их до температуры—110° не взрываются от заряда гремучей ртути даже весом 2 *г*.

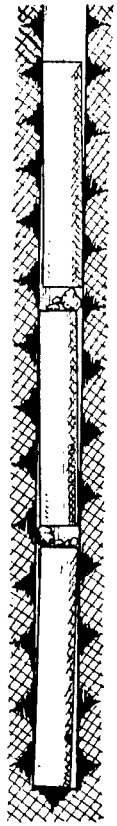


Рис. 10. Промежутки между патронами вследствие попадания кусочков породы

С повышением плотности ВВ чувствительность к детонации падает. Порошкообразный тротил при плотности около 1 *г/см*^{3} надежно взрывается от капсюля-детонатора № 8, а литой и запрессованный до плотности выше 1,5 *г/см*^{3} взрывается только от промежуточного детонатора. Восприимчивость аммонитов с повышением их плотности также заметно падает. Для взрыва зарядов аммонита № 6 с плотностью выше 1,45 *г/см*^{3}, как правило, требуется промежуточный детонатор.

Флегматизаторами в отношении восприимчивости ВВ к детонации обычно являются те же вещества (вода, парафин, церезин), которые понижают чувствительность ВВ к механическому импульсу.

Сенсибилизаторами служат в основном примеси более восприимчивых и мощных ВВ, чем основное инициируемое ВВ. Например, восприимчивость аммонитов можно повысить увеличением содержания в нем тротила или введением добавок нитроглицерина, тэна и гексогена.

ГЛАВА IV

СТОЙКОСТЬ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ

Стойкостью взрывчатых веществ называют способность ВВ сохранять в практических условиях хранения постоянными свои первоначальные химические и физические свойства.

В соответствии с этим различают химическую и физическую стойкость ВВ.

Изменение химического и физического состояния взрывчатых веществ может сопровождаться повышением или понижением способности ВВ к взрыву. Так, например, гигроскопичные и слеживающиеся аммониты или стареющие динамиты в процессе хранения теряют способность к взрыву и не детонируют под действием взрыва обычных средств взрывания. Динамиты со следами выделения жидких нитроэфиров становятся настолько чувствительными к механическим воздействиям, что их запрещают применять ввиду большой опасности непредвиденных взрывов. Нестойкие нитроглицериновые ВВ способны к самоускоряющемуся разложению, приводящему к загоранию и взрыву всей массы хранимых ВВ.

За взрывчатыми веществами, нарушение стойкости которых приводит к самопроизвольному взрыву или повышенной опасности в обращении, устанавливают постоянный контроль.

ХИМИЧЕСКАЯ СТОЙКОСТЬ

Химической стойкостью ВВ называют способность их сохранять практически неизменными химический состав и химические свойства в течение достаточно длительного времени. Она зависит от химической природы и чистоты ВВ.

Нитросоединения относятся к группе химически стойких взрывчатых веществ. Не загрязненные посторонними примесями, они могут годами храниться без изменения состава и свойств. Особенно высокой химической стойкостью отличается тротил.

Достаточной химической стойкостью в нормальных условиях хранения обладают также все применяемые инициирующие ВВ.

Химическая стойкость нитроэфиров и взрывчатых веществ на их основе низкая. В ряду нитроэфиров химическая стойкость снижается по мере увеличения количества нитратных групп. Так, стойкость глицеринтринитрата ниже, чем глицериндинитрата.

Кроме количества нитратных групп, большое значение имеет их расположение в молекуле ВВ, а также жесткая ориентация молекул в кристаллической решетке. Твердый нитроэфир тэн, содержащий четыре нитратные группы, разделенные между собой центральным атомом углерода, химически значительно более стоек, чем жидкие глицеринтринитрат или этиленгликольдинитрат.

Принятые к применению аммиачно-селитренные взрывчатые вещества относятся к химически стойким веществам.

Повысить или понизить химическую стойкость ВВ в некоторых пределах можно введением в них специальных примесей.

Понижают химическую стойкость ВВ вещества, которые влияют на процесс разложения как катализаторы—ускорители. При разложении нитроэфиров выделяются окислы азота (NO, N_2O_3, NO_2), которые, соприкасаясь с разлагающимся веществом, ускоряют его разложение. Таким образом, раз начавшийся процесс разложения будет ускоряться, если не исключить вредное влияние продуктов разложения.

Значительно повышают скорость разложения и понижают стойкость взрывчатых веществ даже следы свободных кислот. Так, например, стойкость нитроглицериновых ВВ окажется очень низкой, если в их составе содержится тротил или другое нитросоединение, недостаточно хорошо отмытое от кислот.

Химическая стойкость ВВ понижается, если хранить их при повышенных температурах. Так, с повышением температуры хранения на 10° скорость разложения ВВ увеличивается примерно в четыре раза.

Разложение химически нестойких нитроэфиров или ВВ и порохов на их основе сопровождается выделением тепла. Разогрев вещества способствует еще большему его разложению. В результате, процесс может завершиться вспышкой или взрывом. Известны случаи взрывов складов с нитроглицериновыми ВВ и порохами при недостаточном контроле за химической стойкостью хранимого продукта.

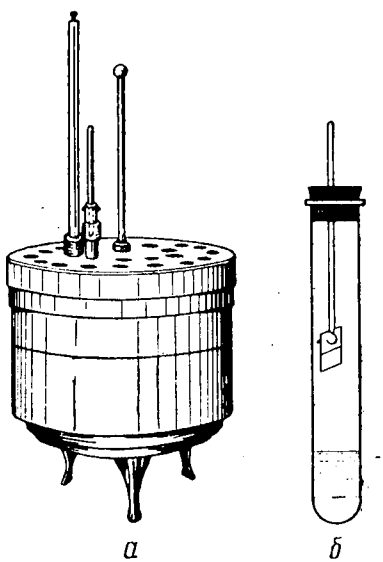
Для повышения химической стойкости ВВ в их состав вводят стабилизаторы, связывающие или нейтрализирующие продукты разложения ВВ. Например, в состав нитроглицериновых ВВ иногда вводят небольшое количество мела или соды. При приготовлении порохов применяют такие стабилизаторы, как дифениламин, централит и др.

Способы определения химической стойкости. Существует много способов для определения химической стойкости ВВ. Большинство из них основано на определении времени, в течение которого в стандартных температурных условиях испытания концентрация продуктов разложения становится достаточной для ясного обнару-

жения индикаторами (иодокрахмальная или лакмусовая пробы) или другими легко осуществимыми способами.

Для определения стойкости нитроглицерина и нитроглицериновых ВВ наибольшее распространение имеет иодокрахмальная проба.

Иодокрахмальная проба. По этой пробе продукты разложения—окислы азота—улавливаются чувствительной иодокрахмальной бумажкой, которую приготовляют из белой фильтровальной бумаги, пропитывая ее водными растворами иодистого калия и крахмала. При воздействии на иодокрахмальную бумагу окислов азота бесцветный ион иода (I') в иодистом калии переходит в элементарный иод (I) и с крахмалом дает характерное бурое окрашивание. Для более четкого обнаружения реакции иодокрахмальную бумажку перед испытанием до половины смачивают водным раствором глицерина. Тогда на границе раздела сухой и влажной бумажек получается ясно различимая цветная полоса.



а *б*

Рис. 11. Прибор для определения химической стойкости по иодокрахмальной пробе: *а* — общий вид прибора; *б* — пробирка с навеской ВВ и иодокрахмальной бумажкой

Испытания проводят следующим образом. Определенную навеску испытуемого вещества помещают в пробирку и плотно закрывают пробкой, через которую пропущена стеклянная палочка с платиновым крючком на конце. На крючок подвешивают индикаторную иодокрахмальную бумажку. Снаряженные пробирки помещают в заранее подогретую до определенной температуры водяную баню с электрическим обогревом. Для контроля за постоянством температуры во время опыта в одно из гнезд бани устанавливают пробирку с термометром. Схема аппарата и пробирка, подготовленная к испытанию, показаны на рис. 11.

Время с момента помещения пробирок в баню до появления цветной полосы на иодокрахмальных бумажках фиксируют секундомером. Минимальное время, при котором вещество еще считается стойким, установлено: для нитроглицерина, идущего на приготовление порохов,—30 мин. при температуре 72°; для нитроглицериновых ВВ—15 минут при температуре 75°.

Результаты испытаний по иодокрахмальной пробе не дают точных характеристик химической стойкости для некоторых ВВ. Ее показания зависят от влажности, степени измельчения и летучести испытываемых веществ. Так, например, вещества с более стойким, но сильно летучим нитрогликолем показывают более низкую стой-

кость по этой пробе, чем при испытании другими способами. Кроме того, результаты иодокрахмальной пробы зависят от субъективной способности лиц, проводящих испытания, вовремя определить момент изменения цвета иодокрахмальной бумажки.

Однако благодаря сравнительной простоте и быстроте выполнения иодокрахмальная проба и в настоящее время имеет широкое распространение.

Лакмусовая проба. Лакмусовую пробу применяют для контроля химической стойкости бездымных (коллоидных) порохов и нитроклетчатки. В этой пробе мерой стойкости так же, как и в иодокрахмальной пробе, является время, в течение которого при температуре 106,5° степень разложения испытуемого вещества достигает предела. При этом появление кислых продуктов фиксируется лакмусовым индикатором.

Лакмусовая проба бывает простая и повторная. В первом случае испытание ведется до появления окрашивания, но не дольше 7 час. При повторной пробе опыты повторяют с одной и той же навеской 10 раз, с перерывами 16—20 час. между каждыми двумя определениями. Прибор для определения химической стойкости ВВ по лакмусовой пробе показан на рис. 12.

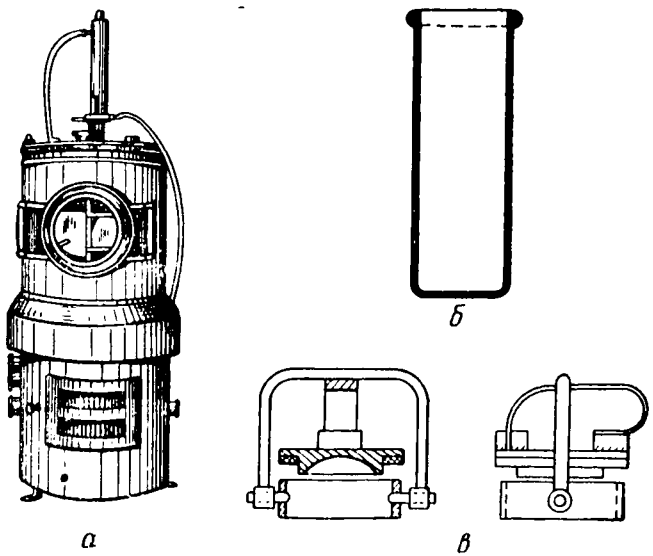


Рис. 12. Прибор для определения химической стойкости по лакмусовой пробе: *а* — общий вид термостата; *б* — стаканчик; *в* — крышка

Стойкие пороха должны выдерживать испытание по простой пробе не менее 6 час., а по повторной—60—70 час.

Проба взвешиванием. По этой пробе интенсивность

процесса разложения фиксируют по потере в весе испытуемой навески, выдерживаемой при температуре 95°. Потерю в весе выражают в процентах и откладывают на графике (рис. 13). Опыт ведут до начала прогрессивного разложения пороха, на что указывает резкий перегиб кривой.

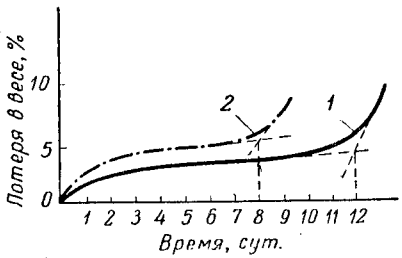


Рис. 13. Характеристика химической стойкости ВВ по потере в весе: *1* — порох стойкий; *2* — порох малостойкий

Для стойких порохов перегиб кривой должен быть не раньше, чем через 10 суток с начала нагревания проб.

Кроме указанных проб для определения химической стойкости применяют также пробы, по которым фиксируют нарастающее давление продуктов разложения (манометрическая проба), количественно определяют выделяющиеся при разложении окислы азота (железнодорожная проба) или концентрацию водородных ионов в водном растворе продуктов разложения ВВ и порохов.

ФИЗИЧЕСКАЯ СТОЙКОСТЬ ВВ

Физической стойкостью взрывчатых веществ называют способность ВВ сохранять неизменными свои физические свойства и структуру в условиях нормального хранения и применения.

К физически нестойким относят ВВ, способные увлажняться под действием влаги воздуха, увлажняться и растворяться под действием воды, изменять при хранении свою первоначальную структуру, выделять жидкие и газообразные продукты из массы вещества, испаряться и изменять первоначальную плотность.

Склонность ВВ к тем или иным физическим изменениям фиксируется различными специальными пробами.

Мы остановимся на тех основных физических изменениях ВВ, которые могут оказать существенное влияние на способность их к взрыву или сделать неудобными в обращении.

Гигроскопичность. Гигроскопичностью называют характерную для многих веществ способность при определенных внешних условиях поглощать влагу из окружающей атмосферы. Гигроскопичностью обладают аммиачно-селитренные ВВ, содержащие в своем составе очень гигроскопичное вещество—аммиачную селитру (см. гл. 15).

Процесс поглощения влаги совершенно сухим веществом начинается с адсорбции водяных паров, в результате чего на поверхности и в капиллярах твердого тела образуется пленка воды. Адсорбционной способностью обладают как растворимые, так и нерастворимые в воде вещества, поэтому и гигроскопичностью обладают не

только растворимые соли, но и такие нерастворимые в воде вещества, как древесная мука, торф и т. п.

После адсорбции растворимым в воде веществом некоторого количества влаги на поверхности кристаллов образуется тонкий слой насыщенного раствора. Дальнейшее увлажнение связано с поглощением влаги насыщенным раствором вещества, находящимся на поверхности частичек. Поглощение насыщенным раствором влаги из воздуха происходит в том случае, если упругость водяных паров над ним выше некоторой определенной для каждого вещества величины, зависящей от температуры.

Максимальное давление (упругость) водяных паров в воздухе, соответствующее точке насыщения, находится в следующей зависимости от температуры:

Температура, град.	0	20	40	60	80	100
Давление, *мм* рт. ст.	4,6	17,4	55,0	149,2	355,5	760

Насыщенный раствор любого вещества будет поглощать водяные пары из воздуха, если последний насыщен ими. Однако практически в воздухе всегда содержится меньше водяных паров, чем это соответствует точке насыщения. Если упругость водяных паров на открытом воздухе окажется меньше упругости водяных паров, которую мы можем наблюдать в закрытом сосуде над насыщенным раствором вещества при той же температуре, то вещество на открытом воздухе не будет поглощать водяные пары, т. е. не будет увлажняться.

Очень важной характеристикой состояния атмосферы является относительная влажность воздуха.

Для каждого вещества при данной температуре можно подобрать такую относительную влажность воздуха, при которой вещество не будет ни подсыхать, ни увлажняться. В этом случае упругость водяных паров в воздухе должна быть равной упругости водяных паров над насыщенным раствором вещества. Относительную влажность воздуха, при которой не происходит ни подсыхания ни увлажнения вещества, называют его гигроскопической точкой.

Математически гигроскопическая точка выражается формулой:

$$h = \frac{P_a}{P} \cdot 100,$$

где: P_a —упругость пара над насыщенным раствором вещества, *мм* рт. ст.;

P —упругость пара, насыщающего воздух при той же температуре, *мм* рт. ст.

Гигроскопическая точка служит одной из характеристик стойкости различных веществ в отношении увлажнения. Чем выше гигроскопическая точка того или иного вещества, тем менее гигроскопичным оно является.

Величина гигроскопической точки зависит от температуры

(табл. 2). Обычно чем выше температура, тем при меньшей относительной влажности увлажняется вещество. Происходит это потому, что упругость водяных паров над насыщенным раствором с повышением температуры растет в меньшей мере, чем упругость водяных паров, насыщающих воздух. Наиболее заметно это для веществ, растворимость которых в воде сильно растет с повышением температуры (аммиачная селитра) и почти незаметно для веществ с малоизменяющейся при повышении температуры растворимостью (поваренная соль).

Таблица 2

Гигроскопические точки некоторых веществ при различных температурах

Наименование вещества	Гигроскопические точки насыщенных растворов в процентах относительной влажности при температуре, град.						
	10	15	20	25	30	40	50
Нитрат аммония	75,3	69,8	66,9	62,7	59,4	52,5	48,4
Хлористый натрий	76,6	77,0	73,6	75,5	75,2	74,7	74,1
Нитрат натрия	78,0	76,8	77,1	74,4	72,4	70,1	67,3
Хлористый калий	88,3	86,2	85,7	83,4	84,0	81,2	80,0
Нитрат калия	97,0	95,6	92,3	92,0	90,5	87,9	85,0

Гигроскопическую точку практически находят, выдерживая навески вещества в эксикаторах над растворами, имеющими различную, но заведомо определенную упругость водяных паров. Взвешивая образцы вещества после выдержки над этими растворами, находят, при какой упругости водяных паров вес образца не изменяется.

Часто о гигроскопичности ВВ судят не по гигроскопической точке, а по скорости их увлажнения по сравнению с другими веществами, гигроскопичность которых известна. Скорость увлажнения обычно тем больше, чем ниже гигроскопическая точка, поэтому по скорости увлажнения можно до некоторой степени судить об истинной гигроскопичности вещества.

Вследствие гигроскопичности аммиачно-селитренные вещества увлажняются, а иногда даже полностью растворяются, образуя насыщенный раствор селитры. Гигроскопичные вещества при хранении или применении их во влажной атмосфере частично либо полностью теряют способность к взрыву. Подсушивание вещества после сильного его увлажнения не всегда приводит к восстановлению взрывчатых свойств (детонационной способности, бризантности и пр.), так как при подсушивании происходит перекристаллизация аммиачной селитры, укрупнение частиц и нарушение структуры ВВ.

Из ВВ, содержащих в своем составе наряду с гигроскопичными солями (аммиачная или натриевая селитры) жидкий нитроглицерин, последний вытесняется влагой, поглощаемой из воздуха, и выделяется на поверхности в свободном виде.

Кроме того, гигроскопичность аммиачно-селитренных ВВ способствует их слеживанию.

Слеживаемость. Слеживаемостью называют способность некоторых порошкообразных веществ терять при хранении сыпучесть и превращаться в прочную сплошную массу. Патроны слежавшегося аммонита, например, могут настолько упрочняться, что их не всегда удается размять руками.

Явление слеживаемости наблюдается не только у порошкообразных, но и у прессованных или шнекованных (уплотненных с помощью шнеквинта) зарядов.

Слежавшиеся ВВ неудобны в обращении и дают меньшую плотность заряжания, чем в сыпучем состоянии. Однако главное отрицательное влияние слеживаемости заключается в сопутствующем ему снижении, а иногда и полной потере слежавшимися зарядами взрывчатых свойств.

Основной причиной слеживаемости аммиачно-селитренных смесей является связывание частиц вещества вновь образующимися в процессе хранения кристаллами аммиачной селитры.

Известно, что наибольшей слеживаемостью обладают материалы, хорошо растворимые в воде. В этом случае поглощенная продуктом влага образует пленку насыщенного раствора солей вокруг каждой частицы вещества. При подсыхании или понижении температуры смеси из раствора выделяются новые кристаллы, связывающие ранее свободные частицы продукта в прочный конгломерат. В этом случае слеживаемость зависит от изменения растворимости вещества, от начальной влажности, гигроскопичности и от колебания температуры в процессе хранения ВВ.

Аммиачная селитра или ее смеси, подвергающиеся в процессе хранения сдавливанию, слеживаются в значительно большей степени, чем соли, находящиеся в свободном состоянии. Сдавливание способствует сближению частиц и увеличению площади их соприкосновения, а также улучшает условия сцепления частиц с образующимися новыми кристаллами при подсыхании или охлаждении веществ.

Влияние увлажнения аммонита на его слеживаемость при давлении 0,15 *кг/см*^{2} видно из следующих данных:

Увлажнение вещества, %	Сопротивление раздавливанию высушенного до влажности 0,15% образца, *кг/см*^{2}
0,15	0,0
0,50	2,4
1,20	6,0

Следует отметить, что увлажненное вещество способно легче уплотняться, что также способствует повышению слеживаемости.

В обычных условиях хранения ВВ не всегда наблюдается прямая зависимость между гигроскопичностью и слеживаемостью веществ. Вещества, имеющие очень низкую гигроскопическую точку (50—70%), легко увлажняются, однако переход из состояния увлажнения к подсыханию у таких веществ происходит реже, чем у веществ с более высокой гигроскопической точкой. Поэтому благоприятные условия для слеживаемости веществ с очень низкой гигроскопической точкой (подсыхание) создаются реже, чем для веществ с более высокой гигроскопической точкой.

Вопрос о слеживаемости при переходе кристаллов вещества из одних модификаций в другие являлся предметом многочисленных исследований, в результате которых было установлено, что при незначительной влажности селитры и смесей на ее основе модификационное превращение не вызывает слеживаемости.

Определенное влияние на слеживаемость веществ оказывает их гранулометрический состав или степень измельчения. Как правило, с увеличением размера частиц склонность веществ к слеживаемости при прочих равных условиях снижается.

Величина частиц, *мм*	Сопротивление раздавливанию слежавшихся образцов, *кг/см²*
Меньше 0,5	43,3
0,5 —1,25	20,0
1,25—2,0	7,5

Ввиду непосредственной связи между увлажняемостью и слеживаемостью аммиачно-селитренных ВВ все меры, применяемые к предохранению ВВ от увлажнения, способствуют и уменьшению их слеживаемости.

Для уменьшения слеживаемости следует следить за тем, чтобы укупорка аммонитов производилась при температуре, близкой к комнатной. В процессе смешивания аммониты разогреваются до 50—60°. Если принять, что влажность их равна 0,3%, то в каждой тонне продукта при этой температуре будет находиться в растворе 15 *кг* аммиачной селитры, которая, выкристаллизовываясь при охлаждении состава, свяжет частицы аммонита.

Аммониты, содержащие в своем составе нерастворимые вещества, способствующие разрыхлению массы, например древесную муку, слеживаются несколько меньше, чем аммониты без таких разрыхлителей. В условиях большого внешнего давления аммониты с добавками разрыхлителей также способны слеживаться.

В настоящее время нет общепринятых методов определения способности к слеживанию аммиачно-селитренных ВВ. Степень слежалости чаще всего качественно определяют по усилиям, необходимым для разминания (восстановления порошкообразной структуры) ВВ в патроне или мешке. При этом отмечается слабая или сильная слежалость ВВ.

При разработке новых сортов аммонитов способность их к слеживаемости устанавливают в условиях, благоприятствующих протеканию процесса слеживания. Для этого навеску испытуемого ВВ подвергают увлажнению, а затем высушиванию под некоторой нагрузкой. Степень слежалости образца после высушивания устанавливают по его прочности, измеряемой как сопротивление раздавливанию в *кг/см²* (при постоянных размерах и форме образцов) или как сопротивление прокалыванию острием определенной формы (игла Вика).

Для более полной характеристики ВВ следует определять способность его к слеживанию в условиях переменной влажности и различной внешней нагрузки.

Водоустойчивость. Водоустойчивыми принято называть такие взрывчатые вещества, заряды которых способны при непосредственном соприкосновении с водой сохранять в течение некоторого времени неизменными свои взрывчатые свойства или менять их в незначительных пределах.

Изменение взрывчатых свойств ВВ при соприкосновении с водой может происходить либо вследствие флегматизирующего действия воды, либо в результате частичного или полного растворения в воде отдельных компонентов.

Все нитросоединения практически нерастворимы в воде или растворимы в незначительной степени. Не взаимодействуют с водой также и желатинированные динамиты; они хорошо взрываются под водой и поэтому являются водоустойчивыми ВВ. Однако бывают случаи, когда нерастворимые в воде дисперсные ВВ, такие, например, как измельченный и особенно чешуйчатый тротил (см. главу 14), при засыпке в скважину, наполненную водой, могут оказаться недетонационноспособными. В этом случае вода, обволакивающая каждую частицу ВВ, затрудняет распространение детонации по заряду.

В целях предотвращения проникания в заряд слишком большого количества воды целесообразно обводненные скважины заряжать не засыпкой, а путем помещения в них плотных зарядов ВВ в достаточно прочных оболочках. Заряды из кусков прессованного тротила хорошо детонируют и при помещении их в обводненные скважины без оболочек.

Многие аммониты и взрывчатые вещества с небольшим содержанием нитроглицерина относятся к водонеустойчивым ВВ, и в обводненных выработках их можно применять только в водонепроницаемых оболочках. В качестве последних применяют бумажные, покрытые гидроизоляцией, полихлорвиниловые, резиновые и металлические оболочки. Водонеустойчивость является большим недостатком указанной группы промышленных ВВ, ограничивающим их применение. В последние годы разработаны специальные сорта аммонитов с достаточно высокой водоустойчивостью. Способ придания водоустойчивости аммиачно-селитренным ВВ основан на понижении смачиваемости их водой при введении в состав аммонитов так называемых гидрофобных добавок.

По структуре порошкообразные вещества можно рассматривать как системы, состоящие из множества капилляров. В зарядах из порошкообразных ВВ, погруженных в воду, можно наблюдать явление капиллярности.

Капиллярность—свойство, зависящее от притяжений на границе между жидкостью и твердым телом. Если притяжение между частицами жидкости и твердого тела больше, чем между частицами самой жидкости, то последняя, как говорят, «смачивает» твердое тело. В обратном случае твердое тело «не смачивается». Жидкость около стенок сосуда поднимается в случае смачивания и опускается, когда жидкость не смачивает стенок. Это особенно заметно в очень узких трубках, называемых капиллярами. Смачивающиеся капилляры при погружении их в воду очень быстро заполняются водой, а не смачивающиеся—не заполняются (рис. 14).

Смачивающиеся водой вещества называют гидрофильными, несмачивающиеся—гидрофобными.

Основные компоненты промышленных взрывчатых веществ гид-

рофильны. Особенно хорошо смачиваются растворимые в воде соли: аммиачная селитра, хлористый калий и др.

Если в составе ВВ содержатся в достаточном количестве тонкоизмельченные гидрофобные вещества, например, парафин, асфальтит, некоторые сорта сажи, стеариновая кислота и ее нерастворимые в воде соли и эфиры, то последние, опудривая частички ВВ

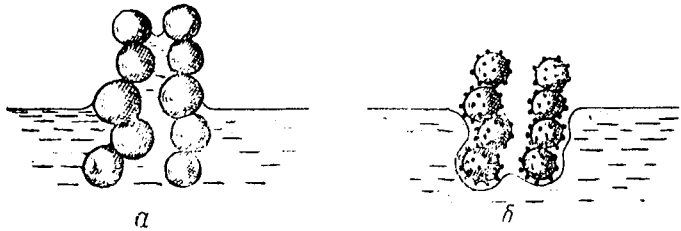


Рис. 14. Схема явлений капиллярности в порошкообразных взрывчатых веществах: *а*— смачивающийся капилляр из гидрофильных частичек ВВ; *б* — несмачивающийся капилляр из частичек ВВ, опудренных гидрофобными веществами

или покрывая их поверхность тончайшими пленками, образуют несмачивающиеся водой капилляры. Внутрь капилляров вода может проникать лишь при приложении достаточно большой внешней силы (повышенное гидростатическое давление). Эта сила должна быть тем больше, чем выше гидрофобные свойства веществ, входящих в состав ВВ, и чем тоньше капилляры, образованные промежутками между частицами ВВ. Особенно высокой гидрофобностью из числа перечисленных выше веществ обладает парафин.

Помимо абсолютной гидрофобности, зависящей от сил притяжения на границе жидкость—твердое тело, большое значение имеет так называемая гистерезисная гидрофобность, зависящая от формы частиц твердого тела. Наличие множества острых граней на частицах твердого тела затрудняет смачивание. Благодаря этим граням создается временное сопротивление прониканию жидкости в заряды порошкообразных ВВ. Поэтому некоторые мелкодисперсные вещества с острыми гранями частиц (например асфальтит), менее гидрофобные, чем пластичный парафин, оказываются более эффективными при введении их в состав ВВ для придания ему водоустойчивости.

Большинство гидрофобных добавок сильно флегматизирует ВВ. Так, например, предельный инициирующий заряд (см. главу 21) гремучей ртути для аммонита № 6 при добавлении к нему 1% стеарата кальция повышается с 0,3 до 0,8 *г*, а для динафталита—с 0,6 до 1,25 *г*. Кроме того, увеличение содержания гидрофобных добавок при сохранении требуемого кислородного баланса аммонита влечет за собой уменьшение содержания в составе взрывчатого компонента (тротила), вследствие чего при значительном содержании гидрофобных добавок детонационная способность ВВ может оказаться пониженной. Поэтому содержание гидрофобных добавок в составе ВВ должно быть минимальным.

Хорошая водоустойчивость аммонитов при малом содержании гидрофобных добавок может быть достигнута в результате очень тщательного распределения тонкоизмельченной гидрофобной добавки в массе ВВ. Лишь в этом случае создаются условия для образования большого количества несмачивающихся водой капилляров. Флегматизирующее действие гидрофобных добавок может быть в значительной мере компенсировано тонким измельчением аммонита, при котором улучшается его детонационная способность.

Во взрывчатых веществах, содержащих в своем составе жидкие нитроэфиры, действие гидрофобных добавок ослабляется тем, что жидкие гидрофильные нитроэфиры смачивают поверхность гидрофобных частиц. Для устранения этого явления увеличивают вязкость жидких нитроэфиров, вводя небольшие количества нитроклетчатки.

Замокание зарядов водоустойчивых аммиачно-селитренных ВВ зависит от температуры воды, окружающей заряд. При повышении температуры воды время, в течение которого аммонит сохраняет свои взрывчатые свойства, снижается. В проточной воде заряды аммиачно-селитренных ВВ намокают быстрее, чем в неподвижной.

Существенное влияние на скорость намокания зарядов оказывают их размеры и расположение. Обычно с момента погружения заряда водоустойчивого аммонита в воду начинается постепенное проникание окружающей воды в заряд. Вода проникает в заряд со всех сторон, однако в нижней части значительно скорее, чем в верхней (рис. 15). Чем больше глубина погружения патронов и, в особенности, чем больше разность гидростатических давлений столба воды на уровнях торцов патрона, тем сильнее происходит замокание патрона со стороны нижнего торца с одновременным вытеснением воздуха из верхнего. Следовательно, чем больше длина патрона, тем легче он будет замокать в воде. В патроне большего диаметра сухая центральная часть его дольше сохраняет размеры (диаметр), превышающие критические для данного аммонита, и таким образом более продолжительное время заряд остается взрывоспособным.

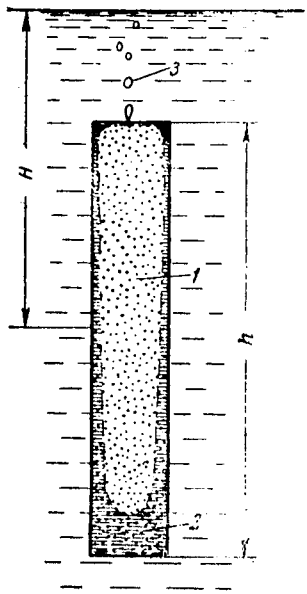


Рис. 15. Замокание патрона в воде: *1* — сухое ВВ; *2* — намокшая часть патрона; *3* — пузырьки вытесняемого воздуха; *h* — давление (высота водяного столба), вытесняющее воздух из патрона; *H* — среднее гидростатическое давление, сжимающее воздух внутри патрона

Водоустойчивость ВВ при испытании в полигонных и лабораторных условиях принято характеризовать сохранением способности к

передаче детонации на расстояние после выдержки патронов в воде в течение определенного времени.

Стандартными считают условия испытания, при которых патроны диаметром 32 *мм* и весом 200 *г* помещают в вертикальном положении в бак с водой таким образом, чтобы над их верхним торцом находился столб воды высотой 1 *м*. В таком положении патроны выдерживают в течение одного часа.

Извлеченные из воды патроны должны передавать детонацию по стандартной пробе на расстояние, незначительно отличающееся от расстояния, установленного для сухих патронов. Минимальное расстояние, на которое должна передаваться детонация, должно быть по крайней мере не менее 2 *см*.

Водоустойчивые заряды повышенной плотности и больших размеров (для скважин) проверяют на полноту детонации после выдержки без оболочки в воде в вертикальном положении в течение 4 час. О полноте детонации судят по образованию после взрыва воронки и по отсутствию остатков ВВ.

В тех случаях, когда затруднительно провести испытание взрывом выдержанных в воде зарядов, пользуются методом определения глубины замокания заряда. Для этого вынутые из воды патроны

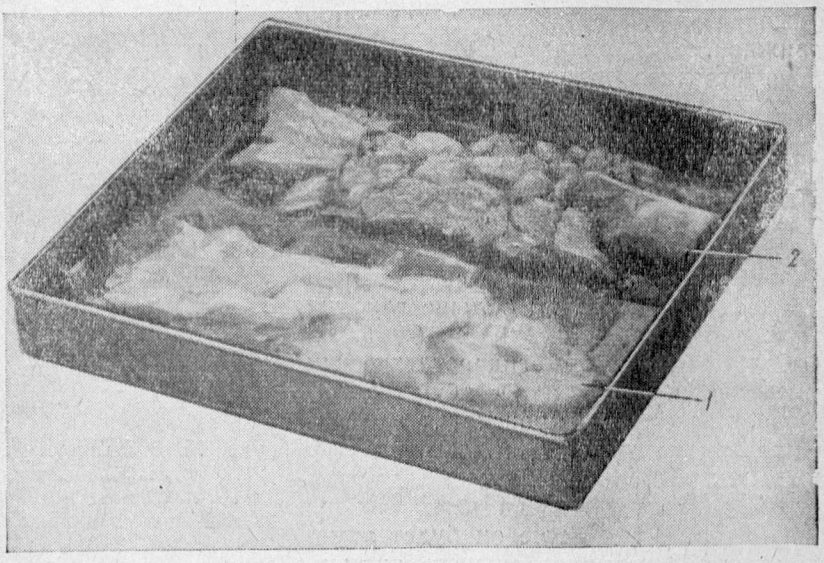


Рис. 16. Внешний вид развернутых патронов аммонитов после выдержки в воде: *1* — неводоустойчивый аммонит после минутной выдержки в воде; *2* — водоустойчивый аммонит после часовой выдержки в воде

освобождают от оболочки и осторожно разрезают по оси. Замокшая часть заряда заметно отличается от сухой по цвету. По состоянию вещества в патроне ясно видно, является ли оно водоустойчивым или нет (рис. 16).

В последнее время получил распространение лабораторный метод испытания ВВ на водоустойчивость, основанный на определении давления, необходимого для проникновения воды через слой ВВ установленной толщины и плотности при строго постоянной скорости нарастания давления (рис. 17).

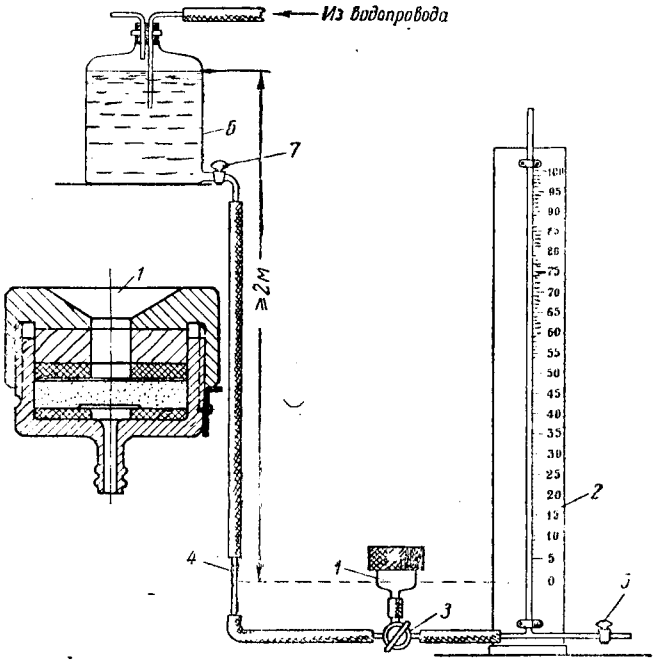


Рис. 17. Схема гидродинамического прибора для определения водоустойчивости порошкообразных ВВ: *1*—сборка для ВВ; *2* — градуированная манометрическая трубка; *3* — трехходовой кран; *4* — капилляр: *5* — спускной кран; *6* — бутыль с водой постоянного уровня; *7* — регулировочный кран

Результаты испытания некоторых порошкообразных водоустойчивых аммонитов этим методом представлены ниже.

Наименование аммонита	Давление, *см* вод. ст., необходимое для проникновения воды через слой ВВ
Аммонит № 6 (неводоустойчивый)	0
Аммонит скальный № 1	70—80
Аммонит В-3	60—80
Аммонит № 6ЖВ	45—60
Водоустойчивая ожелезненная селитра	15—30

Плотность ВВ. Детонационная способность взрывчатых веществ и некоторые взрывчатые характеристики их тесно связаны с плот-

ностью ВВ. В практике работ с ВВ различают следующие виды плотностей: а) гравиметрическая, или насыпная, определяемая как отношение веса свободно насыпанного в цилиндр ВВ к объему цилиндра; б) плотность патронов или зарядов, обычно определяемая как отношение веса всего патрона или иного заряда ВВ (вес собственно ВВ и вес оболочки) к объему всего патрона или заряда с оболочкой; в) плотность заряжания, представляющая собой отношение веса заряда ВВ к объему зарядной камеры, отведенной под заряд ВВ.

На взрывных работах применяют ВВ в порошкообразном состоянии при плотности около 1 *г/см*^{3}, в шнекованном или прессованном состоянии при плотности около 1,25 и 1,50 *г/см*^{3} и в пластичном состоянии при плотности около 1,50 *г/см*^{3}.

Плотность аммиачно-селитренных взрывчатых веществ может изменяться в процессе заряжания и хранения как в сторону повышения, так и понижения. Изменение плотности обусловливается главным образом перекристаллизацией селитры в результате изменения температуры и модификационных переходов.

Увлажненные аммиачно-селитренные взрывчатые вещества способны даже при незначительных внешних давлениях повышать свою первоначальную плотность выше критической.

Стандартных или единых общепринятых методов определения способности ВВ к переуплотнению в настоящее время нет. Судить о способности ВВ к переуплотнению можно, сопоставляя их критическую плотность с фактически измеряемой при применении.

Расслаиваемость. Расслаиваемостью называют способность взрывчатых смесей в условиях транспортировки, особенно при неплотной упаковке, к нарушению однородности состава за счет перемещения и накопления в отдельных частях патрона (или иного заряда) компонентов с различным удельным весом.

В незначительной степени явление расслаиваемости присуще всем аммонитам, содержащим в своем составе горючие добавки и другие вещества, отличающиеся по удельному весу от аммиачной селитры. Но соответствующий подбор составов и хорошая технологическая обработка аммонитов на заводах делают это явление практически мало заметным. Наибольшее расслаивание бывает у динамонов.

Расслаивание ВВ можно наблюдать при засыпке их в глубокие скважины, где они подвергаются естественной сепарации. Но благодаря тому, что в скважинах применяют заряды относительно большого диаметра, потери взрывчатых свойств при этом не наблюдается.

Старение—свойство, присущее желатинированным нитроглицериновым взрывчатым веществам.

Старением называют свойство желатиндинамитов снижать восприимчивость к инициированию и скорость детонации вследствие изменения физических свойств желатины при хранении.

Динамиты, содержащие бо́льшее количество коллодионного хлопка, более склонны к старению, чем динамиты с меньшим содержанием коллодионного хлопка. По внешнему виду динамит, подвергшийся старению, отличается от свежеприготовленного большей прозрачностью и меньшей пластичностью.

Несмотря на многочисленные исследования, единого мнения о природе процесса старения нет. Наиболее вероятным считается, что старение динамитов связано с удалением из них воздуха, взвешен-

ного в массе студня в виде мельчайших пузырьков. Это предположение подтверждается тем, что изменения свойств желатиндинамитов, аналогичные наблюдаемым при старении, происходят при выдерживании патронов динамита в вакууме. После вакуумирования патроны становятся прозрачными, плотность их повышается, а восприимчивость к детонации снижается. Существует гипотеза, что включения пузырьков воздуха в массу ВВ способствуют возникновению точек разогрева в результате адиабатического сжатия пузырьков при прохождении ударной волны, а это, в свою очередь, облегчает возникновение химической реакции взрывчатого разложения.

Не исключено, однако, что изменения механических свойств динамитной желатины и само по себе может оказать существенное влияние на взрывчатые свойства динамита. Так же, как и при механическом ударе, при детонации может происходить разогрев продукта в локальных точках не только в результате адиабатического сжатия пузырьков воздуха, но и в результате внутреннего трения перемещающихся друг относительно друга под влиянием ударной волны слоев вещества. Естественно, что возможность таких местных, достаточно интенсивных перемещений находится в зависимости от механических свойств динамитной желатины.

Повышение вязкости желатины при старении может также затруднить диспергирование динамита на фронте детонации и тем самым ухудшить условия проникновения струй газа в массу ВВ, что, с точки зрения теории детонации (см. следующую главу), является неблагоприятным для детонации фактором.

Изменение упругих свойств и снижение восприимчивости динамитов к детонации происходит также в результате их охлаждения. Восстановить восприимчивость охлажденных динамитов к детонации можно путем выдержки их при повышенной температуре (например, при 25—30°).

Для возбуждения процесса детонации у постаревших или охлажденных динамитов приходится применять усиленный инициирующий заряд, а для поддержания процесса детонации иногда вдоль всего заряда динамитов пропускают одну или две нитки детонирующего шнура.

Специальные исследования способности динамитов различных составов к старению производят обычно только в лабораториях или на заводах при разработке новых рецептур.

На местах применения ограничиваются проверкой способности динамитов к передаче детонации на расстояние, которая достаточно хорошо отражает изменение взрывчатых свойств патронов при хранении.

Эксудация. Эксудацией называют способность взрывчатых веществ при хранении выделять из своего состава жидкие или легкоплавкие компоненты.

Взрывчатые смеси со значительным содержанием легкоплавких компонентов или с жидкими невзрывчатыми компонентами у нас не имеют практического применения. Поэтому явление эксудации обычно рассматривают только применительно к нитроглицериновым взрывчатым веществам.

У нитроглицериновых ВВ явление эксудации вызывает повышение опасности их в обращении. Наличие на поверхности патронов

капель высокочувствительного жидкого нитроглицерина может явиться причиной непредвиденных взрывов при заряжании эксудирующих патронов или при неосторожном обращении с ними.

Эксудация динамитов происходит тем легче, чем меньше содержится в динамите коллодионного хлопка. Более склонны к эксудации динамиты, содержащие в своем составе аммиачную селитру. Из составов, содержащих малое количество нежелатинированного нитроглицерина, выделения его обычно не происходит. Но все же патроны с любым ВВ, содержащим нитроглицерин, следует периодически проверять на отсутствие следов эксудации.

Усилению эксудации динамитных патронов способствует попеременное замораживание и оттаивание их, а также хранение при повышенных температурах.

Для установления способности нитроглицериновых ВВ к эксудации испытуемое ВВ помещают в условия, способствующие ускорению процесса эксудации, и в течение определенного времени наблюдают, происходит ли выделение эксудата. Наибольшее распространение получил у нас следующий метод испытания. Из патрона динамита вырезают цилиндрик с равными диаметром и высотой (чаще всего 10 *мм*), помещают его на лист пергаментной бумаги и выдерживают при температуре 30—33° в течение 144 час. Хорошо приготовленный динамит не должен по истечении указанного срока оставлять на бумаге следов нитроглицерина (допускается лишь едва заметное пятно на месте цилиндрика), края цилиндрика не должны быть оплывшими и высота его не должна уменьшаться больше, чем на 25% своей первоначальной величины.

На местах применения нитроглицериновых ВВ отдельные патроны в процессе хранения подвергают периодическому осмотру. При развертывании патрона на внутренней стороне оболочки не должно быть пятен от эксудата. Допускается лишь блестящая полоска вдоль патрона, шириной не более 5 *мм* на линии стыка края бумажной оболочки с находящим на нее при завертывании патрона концом оболочки.

Кроме нитроглицериновых ВВ, склонностью к эксудации, хотя и в меньшей степени, обладают нитроглицериновые бездымные пороха.

ГЛАВА V

ОСНОВЫ ТЕОРИИ ДЕТОНАЦИИ

Детонацией взрывчатых веществ называют такую форму их взрывчатого превращения, которая вызывается проходящей по заряду волной сжатия и характеризуется постоянной и наибольшей для данных условий и состояния ВВ скоростью распространения химического превращения ВВ.

Детонация различных твердых взрывчатых веществ протекает со скоростями от 1500 до 8500 *м/сек*.

Общепринятой теорией детонации взрывчатых веществ является так называемая гидродинамическая теория, основы которой применительно к газам были разработаны в России в 1890 г. В. А. Михельсоном. За рубежом гидродинамическую теорию разработали в конце 90-х годов английский физик Д. Чепман и французский физик Э. Жуге.

Фундаментальное развитие гидродинамическая теория получила в трудах советских ученых Ю. Б. Харитона, Я. Б. Зельдовича, Л. Д. Ландау, Г. И. Покровского, К. П. Станюковича и др.

Гидродинамическая теория детонации основана на теории ударной волны.

Ударные волны. Ударные волны могут возникнуть в любой среде в результате взрыва ВВ, артиллерийского выстрела, большого электрического разряда, сильного удара и других причин, под действием которых получается очень быстрый подъем давления.

Здесь будут рассмотрены ударные волны, возникающие под действием взрыва и способные в свою очередь в определенных условиях вызывать взрыв ВВ. Ударные волны возникают и распространяются в различных средах. Рассмотрим ударную волну, образующуюся в воздухе от действия взрыва заряда ВВ.

Ударная воздушная волна возникает под действием сильно сжатых и нагретых газов взрыва, которые, расширяясь, быстро вытесняют окружающий воздух, сжимая его до высоких давлений и вызывая перемещение области сжатого воздуха во все стороны от очага взрыва. Давление в продуктах взрыва по мере их расширения падает. В некоторый момент, когда давление газов значительно упадет, ударная волна отрывается от газов взрыва и начинает самостоятельное существование.

Перемещающуюся область сжатого воздуха, отделенную резкой границей от остальной атмосферы, до которой еще не дошло действие взрыва, и называют воздушной ударной волной.

При прохождении ударной волны характеристики воздушной среды меняются скачкообразно, т. е. давление, плотность, температура и скорость движения среды изменяются почти мгновенно. Форма ударной волны показана на рис. 18 в виде графика зависимости давления среды от расстояния от центра взрыва. Впереди фронта движения волны находится покоящаяся среда, затем в очень

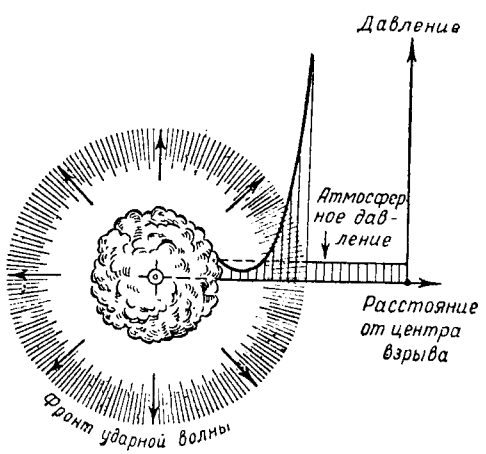


Рис. 18. График распределения давления за фронтом ударной волны. В центре рисунка — облако газов взрыва

короткий промежуток времени и на небольшом расстоянии происходит очень быстрое ее сжатие, при котором она уплотняется, разогревается и приходит в движение. Достигнув максимума, давление в волне сразу же начинает уменьшаться и через некоторый промежуток времени падает до атмосферного, а затем и ниже, и волна сжатия сменяется волной разрежения.

Вблизи очага взрыва распространение ударной волны происходит со скоростью, несколько превышающей скорость детонации. По мере удаления ударной волны от очага взрыва, вследствие необратимого перехода кинетической энергии волны в тепловую и вовлечения все больших масс среды в движение, амплитуда перепада давления уменьшается, скорость волны убывает, и ударная волна переходит в волну звуковую, в которой частицы среды совершают лишь колебательное, но не поступательное движение, и для которой характерна форма, приведенная на рис. 19.

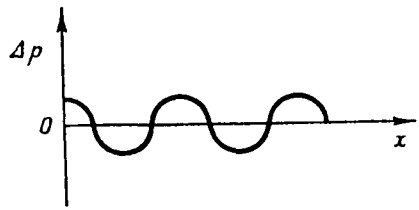


Рис. 19. График звуковой волны

При детонации заряда тротила в воздухе возникает ударная волна, которая вблизи места взрыва распространяется со скоростью 9000 *м/сек*, имея давление во фронте волны 940 *ат* и скачок плотности воздуха, т. е. отношение плотности воздуха во фронте волны к начальной его плотности $\frac{\rho_1}{\rho_0}$, равное 10,9.

Если достаточно интенсивная ударная волна распространяется не в инертной среде, где она затухает, а во взрывчатом веществе, то, сжимая и нагревая его, ударная волна может вызывать быстрое химическое превращение ВВ, т. е. детонацию заряда взрывчатого вещества.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Теория детонации газов развита значительно больше, чем теория детонации конденсированных (твердых и жидких) взрывчатых веществ. Но так как в настоящем курсе не предусматривается подробное изложение гидродинамической теории детонации и рассматриваются только промышленные ВВ, в число которых входят лишь конденсированные ВВ, мы остановимся вкратце на основных положениях гидродинамической теории, применимых к детонации конденсированных ВВ.

При детонации взрывчатых веществ в результате химического превращения ВВ выделяется энергия, которая непрерывно поддерживает проходящую по ВВ ударную волну, не давая ей затухнуть. Распространяющуюся ударную волну и следующую за ней зону химического превращения ВВ называют детонационной волной.

Основной характеристикой детонации ВВ является скорость детонации, т. е. скорость распространения по ВВ детонационной волны. Благодаря очень большой скорости распространения детонаци-

онной волны по заряду ВВ изменения его параметров (давления, температуры, объема) во фронте волны происходят скачкообразно, как и в ударной волне.

Перед фронтом детонационной волны взрывчатое вещество остается, как говорят, еще не возмущенным, т. е. оно сохраняет присущие ему плотность, давление, объем и температуру. Изменение параметров во фронте детонационной волны для конденсированного ВВ схематически показано на рис. 20. Давление P скачкообразно возрастает на фронте ударной волны, а затем в зоне химической

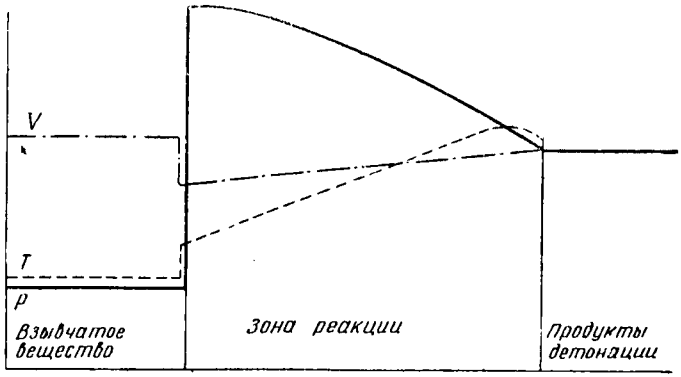


Рис. 20. Схема изменения параметров при детонации конденсированного ВВ

реакции начинает постепенно падать. Температура T также скачкообразно возрастает, но до меньшего предела, а затем по мере химического превращения ВВ несколько возрастает. Объем V, занимаемый взрывчатым веществом, благодаря высокому давлению уменьшается и остается практически неизменным до конца превращения ВВ в продукты детонации.

Характер изменения параметров в зоне химической реакции зависит от скорости химического превращения ВВ. Например, можно предполагать, что в случае детонации грубо измельченных аммонитов в зарядах ограниченного диаметра расширение продуктов взрыва и даже совершение ими работы начинается раньше, чем завершится полное превращение ВВ в продукты взрыва.

Механизм реакции в детонационной волне, в случае детонации газов, жидких ВВ и сплошных твердых ВВ (например литых), может быть представлен следующим образом. Фронт детонационной волны представляет собой сильную ударную волну, которая сжимает взрывчатое вещество. В результате сжатия и разогрева ВВ начинает быстро реагировать, превращаясь в продукты взрыва.

А. Я. Апин дал представление о механизме взрывного горения, согласно которому предполагается, что воспламенение порошков в детонационной волне осуществляется благодаря адиабатическому сжатию газовых включений или струями газов (продуктов взрыва), проникающих в поры между отдельными частицами ВВ и воспла-

меняющих их. Скорость горения частиц в детонационной волне зависит от давления продуктов взрыва, окружающих горящие частицы.

По Я. Б. Зельдовичу, при детонации по механизму взрывного горения скорость детонации определяется давлением продуктов взрыва, а скорость струй при этом автоматически устанавливается равной скорости детонации.

Гидродинамическая теория детонации дает возможность, пользуясь данными о теплоте превращения ВВ и о свойствах продуктов детонации (средний молекулярный вес, теплоемкость и др.), установить математическую зависимость между скоростью детонации, скоростью движения продуктов взрыва, объемом и температурой продуктов детонации.

Для установления этих зависимостей используют общепринятые уравнения, выражающие законы сохранения вещества, количества движения и энергии при переходе от исходного ВВ к его продуктам детонации, а также так называемое уравнение Жуге и уравнение состояния продуктов детонации, выражающее зависимость между основными характеристиками продуктов взрыва. Согласно уравнению Жуге, при установившемся процессе скорость детонации D равна сумме скорости движения продуктов детонации за фронтом w и скорости звука в продуктах детонации c:

$$D = w + c.$$

Для продуктов детонации газов, имеющих сравнительно небольшое давление, применяют общеизвестное уравнение состояния идеальных газов:

$$PV = RT,$$

где: P — давление;
V — удельный объем;
R — газовая постоянная;
T — температура.

Для продуктов детонации конденсированных ВВ в 1944 г. советскими учеными Л. Д. Ландау и К. П. Станюковичем было выведено уравнение состояния:

$$PV^n = \text{const},$$

где: P и V—давление и объем продуктов взрыва в момент их образования;
$n \cong 3$—показатель степени в уравнении состояния для конденсированных ВВ.

По гидродинамической теории скорость детонации

$$D = \sqrt{2(n^2 - 1)Q_v},$$

где Q_v—теплота взрывчатого превращения.

Но обычно скорость детонации с большей точностью определяют экспериментальным путем, а получаемые на основании гидродинамической теории зависимости используют для расчета характе-

ристик детонационной волны, которые трудно определить экспериментально.

Так, например, детонационное давление может быть рассчитано по формуле:

$$P_1 = \frac{\rho_0 D^2}{n+1},$$

где: P_1 — детонационное давление в барах (1 бар $= \frac{1}{98{,}1 \cdot 10^4}$ *кг/см*^{2});

ρ_0 — начальная плотность ВВ, *г/см*^{3};

D — скорость детонации, *см/сек*;

$n \cong 3$ — показатель степени в уравнении состояния для продуктов детонации.

Характеристики детонационных волн некоторых ВВ приведены в табл. 3.

Таблица 3

Характеристики детонационных волн

Наименование ВВ	Плотность заряда ВВ ρ_0, *г/см*^{3}	Скорость детонации D, *м/сек*	Скорость продуктов детонации за фронтом волны w, *м/сек*	Плотность продуктов детонации во фронте волны ρ_1, *г/см*^{3}	Давление на фронте волны p_1, *кг/см*^{2}
Тротил	1,60	7000	1750	2,12	200000
Тетрил	1,63	7460	1870	2,16	236000
Тэн	1,69	8340	2080	2,24	300000
Аммонит № 6	1,00	4500	1040	1,33	58000

Превращение взрывчатых веществ в форме детонации является наиболее желательным, так как оно обеспечивает значительную скорость химического превращения и создает наибольшее давление и плотность продуктов взрыва. Но не во всех условиях взрывчатые вещества способны к такому превращению.

Условие возможности устойчивого распространения детонации взрывчатых веществ сформулировано Ю. Б. Харитоном.

При детонации взрывчатых веществ, вследствие создающихся колоссальных давлений, продукты взрыва разбрасываются во все стороны от центра или оси заряда. Одновременно с расширением и разбрасыванием продуктов взрыва в зоне, где совершается переход от исходного вещества к продуктам взрыва, происходит разбрасывание неуспевшего полностью прореагировать исходного вещества.

Химическая реакция, возникшая во фронте детонационной волны, тормозится разбрасыванием исходного вещества и продуктов взрыва вследствие происходящего при этом понижения температур и давления.

Ю. Б. Харитон впервые указал на существенное значение времени химического превращения взрывчатого вещества во фронте

детонационной волны и установил соотношение между временем реакции и временем разброса.

$$\tau < \theta,$$

где: τ — длительность химического превращения взрывчатого вещества;

θ — время разбрасывания исходного вещества.

Принцип Ю. Б. Харитона можно сформулировать следующим образом: детонация ВВ возможна в том случае, если время химической реакции в детонационной волне меньше времени разброса.

Ю. Б. Харитон ввел представление о критическом диаметре, величина которого является одной из важнейших характеристик ВВ.

Соотношение времени реакции и времени разброса позволяет дать правильное объяснение наличия для каждого ВВ критического или предельного диаметра.

Рассмотрим открытый (без прочной оболочки) цилиндрический заряд ВВ (патрон). При взрыве процесс разбрасывания ВВ начинается на периферии патрона и распространяется внутрь со скоростью звука, которая в каждой данной точке будет зависеть от соотношения количества исходного вещества и продуктов взрыва.

Если обозначить скорость звука в продуктах взрыва через c, а диаметр заряда через d, то время разбрасывания вещества приближенно можно определить из выражения:

$$\theta \cong \frac{d}{c}.$$

Учитывая условие возможности прохождения детонации $\theta > \tau$, можно написать:

$$\frac{d}{c} > \tau,$$

откуда критический диаметр, т. е. наименьший диаметр, при котором еще может протекать устойчивая детонация ВВ, будет равняться:

$$d_{кр} = c\,\tau.$$

Следовательно, для каждого взрывчатого вещества устойчивая детонация возможна лишь в том случае, если диаметр заряда равен или превышает некоторую характерную для него в определенных условиях величину.

Приведенное выражение соотношения времени реакции и времени разброса позволяет определить влияние различных внешних условий, а также физико-химических характеристик ВВ на устойчивость процесса детонации.

Любой фактор, увеличивающий время разбрасывания вещества, как, например, окружение заряда массивной оболочкой, увеличение диаметра заряда, должен способствовать распространению детонации. Так же будут действовать факторы, ускоряющие процесс хи-

мического превращения ВВ в детонационной волне, например, введение в состав ВВ в качестве компонентов высокоактивных веществ мощных и восприимчивых ВВ. Если же ВВ относительно инертно, выделяет мало тепла при химической реакции и температура во фронте детонационной волны сравнительно невелика, то время химической реакции у такого ВВ будет продолжительным. Соответственно этому критический диаметр для такого ВВ должен быть достаточно большим.

Многие промышленные взрывчатые вещества представляют собой смеси, у которых время химического превращения в значительной степени зависит от размеров частиц исходных компонентов, от тщательности смешения их и в большинстве случаев достаточно велико по сравнению со временем химического превращения химически однородных веществ, например тетрила, тэна и др.

В смесевых ВВ, например в аммонитах, превращение компонентов может происходить не с одинаковой скоростью.

Более активные компоненты могут превращаться в газообразные продукты быстрее других. По данным английских исследователей истинная продолжительность реакций отдельных компонентов смеси аммиачной селитры с тротилом в зоне химического превращения составляет для тротила около 0,5 *мсек*, а для аммиачной селитры 2—3 *мсек*.

Степень измельчения отдельных компонентов оказывает, по-видимому, аналогичное влияние на скорость разложения компонентов. Переизмельчение одного из компонентов может обусловить преобладание во фронте детонации продуктов разложения этого компонента и затруднить разложение другого. Неодинаковая скорость превращения в газообразные продукты компонентов смеси во фронте детонации может привести к удлинению зоны химического превращения, к увеличению разброса частиц и поэтому невыгодно отразиться на детонационной способности ВВ и составе продуктов взрыва (повышение образования ядовитых газов).

А. Я. Апин обнаружил, что чрезмерное измельчение торфа в составе динамона ухудшает взрывчатые свойства последнего. Он объясняет это флегматизацией смеси в результате обволакивания частиц селитры невзрывчатым компонентом — торфом и затруднением вследствие этого воспламенения и сгорания частиц. Аналогичным образом можно объяснить худшую детонационную способность смеси аммиачной селитры с мазутом, рассчитанной на нулевой кислородный баланс, по сравнению с составом с пониженным содержанием мазута (рис. 21).

Однако можно предполагать, что причиной пониженной детонационной способности смеси, содержащей большое количество мазута, является легкая газификация последнего и сильно развитая поверхность его на частицах селитры. В результате этого в зоне детонации смеси с нулевым кислородным балансом будут преобладать газообразные продукты с отрицательным кислородным балансом, что может привести к удлинению зоны химического превращения и увеличению потерь энергии при взрыве.

Приведенные примеры показывают влияние состава и технологии обработки промышленных смесевых ВВ на способность их к детонации.

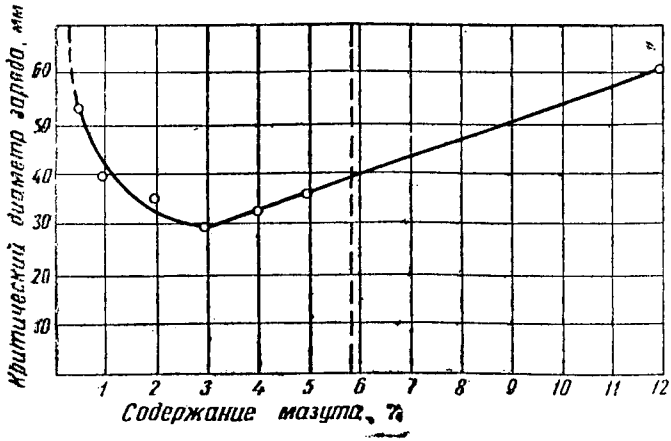


Рис. 21. Детонационная способность смеси селитры с мазутом в зависимости от содержания мазута. Пунктирной прямой показано содержание мазута, отвечающее максимальной работоспособности смеси

Не меньшее влияние на детонационную способность промышленных ВВ имеют физические факторы и условия взрывания зарядов. Рассмотрим некоторые из них.

Критический диаметр[1]. Величины критических диаметров для различных ВВ значительно разнятся между собой. Критический диаметр некоторых однородных ВВ при средней величине частиц 0,18 *мм* и насыпной плотности 1 *г/см*^{3} характеризуется следующими величинами:

Наименование ВВ	Критический диаметр, *мм*
Тэн	3,2
Гексоген	4,4
Тетрил	7,0
Пикриновая кислота	9,0
Тротил	11,0

Величина критического диаметра одного и того же ВВ может меняться в довольно широких пределах, в зависимости от состояния ВВ и условий его взрывания — размеров частиц, качества технологической обработки, наличия и свойств оболочки.

С увеличением размера частиц ВВ величина критического диаметра возрастает. Так, для тротила при величине частиц 0,06 *мм*

[1] В настоящее время в литературе наряду с термином критический диаметр применяется термин предельный диаметр. Но некоторые авторы применяют термин предельный диаметр в ином значении, равнозначно термину оптимальный диаметр, о котором будет сказано ниже.

критический диаметр равен 9 *мм*, а при величине частиц 0,5 *мм* он составляет уже 28 *мм*.

Критический диаметр ВВ, представляющих собой механические смеси, и в частности аммиачно-селитренные ВВ, при соответственно равных размерах частиц и в одних и тех же условиях испытаний выше, чем для большинства однородных ВВ. Кроме того, критический диаметр аммиачно-селитренных ВВ зависит также от их состава.

Наименование ВВ	Критический диаметр, *мм*
Аммонит № 6 (21% тротила)	12
Аммонит № 2 (12% тротила)	15
Аммонит № 10 (8% тротила)	20
Аммонит № 9 (5% тротила)	25

Наибольшую детонационную способность и соответственно меньший критический диаметр имеют составы с более высоким содержанием тротила. Уменьшение содержания тротила и частичная замена его горючими невзрывчатыми добавками (например торфом) повышают критический диаметр ВВ.

Для всех смесей большое влияние на критический диаметр оказывает качество технологической обработки их. Так, с улучшением качества технологической обработки аммонита № 6 уменьшается его критический диаметр (табл. 4).

Таблица 4

Критический диаметр заряда в зависимости от качества технологической обработки аммонита № 6

Характеристика технологической обработки состава	Критический диаметр, *мм*	Примечание
Смешение грубоизмельченной селитры с тонкоизмельченным тротилом в барабане без шаров	20	Заряды в бумажных оболочках. Плотность состава 1 *г/см*³
Смешение предварительно измельченных тротила и аммиачной селитры в шаровой мельнице в течение 10 мин.	12	
Смешивание состава в шаровой мельнице в течение 2 час.	8	

Как уже говорилось, большое влияние на величину критического диаметра оказывает наличие и свойства оболочки. Труднодетонируемая аммиачная селитра при влажности 0,5—0,6% и плотности 1 *г/см*³ устойчиво детонирует в бумажной оболочке только в зарядах диаметром выше 300 *мм*. Сухая аммиачная селитра при плотности около 0,8 *г/см*³ в тонкостенной стеклянной оболочке способна детонировать в зарядах диаметром 80—100 *мм*. Если заряд такой селитры окружить водяной оболочкой с толщиной слоя воды 80—120 *мм*, то устойчивая детонация селитры наблюдается уже при диаметре заряда 40 *мм*, а при помещении заряда в прочную стальную оболочку с толщиной стенок 20 *мм* чистая аммиачная селитра устойчиво детонирует в заряде диаметром 7 *мм*.

Аммонит, близкий по составу к аммониту № 6, в тонкостенной стеклянной оболочке детонирует в заряде диаметром 12 *мм*, а при окружении водяной оболочкой — в заряде диаметром 5 *мм*.

С увеличением диаметра заряда выше критического наблюдается рост скорости детонации (рис. 22). При этом для ВВ одного и того же состава, но различающихся по качеству обработки (о чем

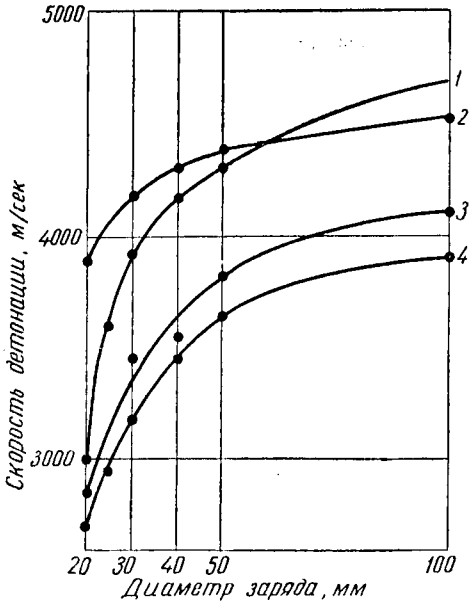


Рис. 22. Кривые зависимости скорости детонации аммонитов в открытых зарядах от диаметра: *1* — для аммонита № 6; *2* — для аммонала ВА-8; *3* — для победита № 6; *4* — для предохранительного аммонита АП-2

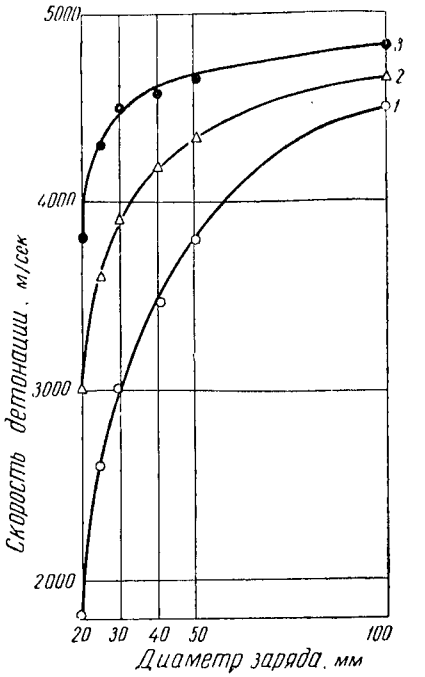


Рис. 23. Кривые зависимости скорости детонации образцов аммонита № 6 от диаметра зарядов: *1* — аммонит с бризантностью 13 *мм*; *2* — с бризантностью 15—16 *мм*; *3* — с бризантностью 18 *мм*

можно судить по показателям бризантности стандартной пробы), разница в скорости детонации убывает (рис. 23).

Для определения условий использования ВВ с максимальным эффектом иногда пользуются величиной так называемого оптимального диаметра. При этом под оптимальным диаметром понимают такой минимальный диаметр, при котором во взрывчатом веществе развивается наивысшая скорость детонации. Увеличение диаметра заряда выше оптимального значения уже не приводит к дальнейшему росту скорости детонации. Оптимальные диаметры обычно превышают критические в 8—13 раз.

Аммониты одного и того же состава, но разной степени обра-

ботки, при испытании в зарядах, диаметр которых равен критическому, детонируют с одинаковой скоростью. Но величины критических диаметров для них будут разными.

При различных, в зависимости от качества технологической обработки, оптимальных диаметрах также наблюдается равенство скоростей детонации. Следовательно, при одинаковом отношении диаметров зарядов (вплоть до оптимальных) к их критическим диаметрам скорости детонации тонко- и грубоизмельченных аммонитов получаются равными. Чем больше диаметр заряда по сравнению с критическим (больше отношение $\frac{d}{d_{кр}}$), тем выше скорость детонации аммонитов (рис. 24). Как видно из графика, максимальная скорость детонации аммонита № 6 при плотности 1 $г/см^3$ достигается при диаметре заряда, превышающем критический не менее чем в 13 раз. Это значит, например, что оптимальный диаметр грубоизмельченного аммонита с бризантностью 13 *мм*, критический диаметр которого равен 20 *мм*, составляет примерно 260 *мм*.

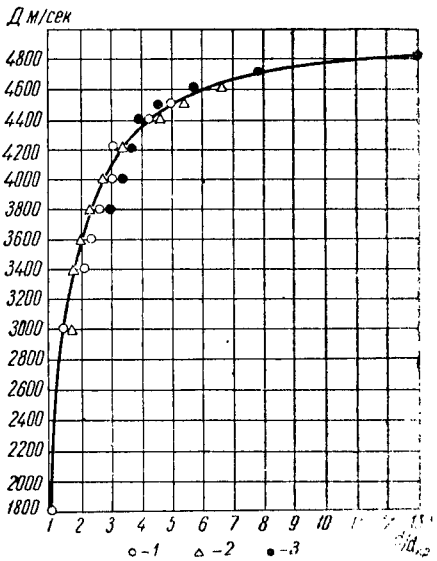


Рис. 24. Скорость детонации аммонита № 6 разного измельчения в зависимости от отношения диаметра заряда к критическому диаметру: *1*—грубоизмельченный аммонит № 6; *2*—среднеизмельченный; *3*—тонкоизмельченный

Критическая плотность. Устойчивое распространение детонации по заряду ВВ определенного диаметра связано с плотностью ВВ. Если диаметр заряда ВВ значительно выше критического, то повышение плотности ВВ приводит к увеличению скорости детонации. Для однородных ВВ, у которых критический диаметр сравнительно мал, увеличение их плотности обычно вызывает повышение скорости детонации, достигающей предела при максимально возможной плотности ВВ. Для аммиачно-селитренных ВВ критические диаметры сравнительно велики и в обычно применяемых зарядах влияние плотности имеет двойственный характер. Увеличение плотности от насыпной до некоторого предела приводит к повышению скорости детонации, а затем при дальнейшем увеличении плотности скорость детонации начинает падать и может наступить затухание детонации.

Таким образом, для каждого аммиачно-селитренного ВВ, в зависимости от условий его применения, существует своя критическая (или предельная) плотность.

Критической называют ту максимальную плотность, при

которой (в данных условиях) еще возможна устойчивая детонация взрывчатого вещества. При ничтожном повышении плотности выше критической детонация затухает.

Так же, как и критический диаметр, критическая плотность связана с характеристиками физического состояния ВВ, его рецептурой, технологией приготовления и условиями применения.

Зависимость между критической плотностью и диаметром зарядов динамона Т (на торфе), приготовленного при разном времени обработки в шаровой мельнице, приведена в табл. 5.

Таблица 5

Критическая плотность динамона Т различной степени обработки для зарядов разных диаметров

Диаметр заряда, *мм*	Критическая плотность, *г/см*³, для зарядов динамона Т, приготовленного по технологии		
	улучшенной	средней	ухудшенной
20	1,08	0,8	Не детонирует при любой плотности
40	1,22	1,03	0,78
50	—	1,10	0,85

Из приведенных данных видно, что критическая плотность возрастает с увеличением диаметра заряда и улучшением его обработки (т. е. повышением степени измельчения и качества смешивания).

Аммониты, содержащие в своем составе, кроме селитры, только тротил, имеют более высокую кристаллическую плотность, чем составы, в которых тротил частично заменен горючими невзрывчатыми добавками (табл. 6).

Таблица 6

Критическая плотность аммонитов разного состава для зарядов различного диаметра

Диаметр заряда, *мм*	Критическая плотность, *г/см*³, аммонитов			Примечание
	№ 6	№ 10	№ 9	
20	1,43	1,05	0,94	Технологическая обработка составов значительно улучшена по сравнению с заводской. Заряды в тонкостенных стеклянных трубках.
25	1,66	1,16	1,00	
40	—	1,38	1,20	

Частичная замена тротила более мощными взрывчатыми веществами приводит к повышению критической плотности.

Критическую плотность довольно часто определяют испытанием ВВ на бризантность при различной плотности. На рис. 25 виден характер изменения величины бризантности аммонитов (обжатие свинцового столбика взрывом заряда) при изменении плотности ВВ. Вначале до некоторого предела плотности бризантность аммонитов возрастает, а затем падает. Однако в отдельных случаях для смесей с большим содержанием активного компонента (тротила, гексогена)

после падения бризантности вновь наблюдается ее повышение при увеличении плотности. Например, состав с 34% флегматизированного гексогена при плотности 1,4 *г/см*³ имеет меньшую бризантность, чем при плотности 1,0 и 1,7 *г/см*³. Такое явление можно объяснить тем, что при большой плотности и достаточном сближении частиц активного компонента создаются условия для непосредственной передачи детонации от одной частицы активного компонента к другой и разложения всего заряда ВВ с характерной для активного компонента зависимостью параметров (бризантность, скорость детонации и др.) от плотности.

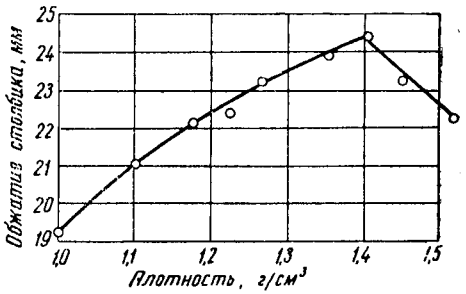


Рис. 25. Зависимость бризантности тонкообработанного аммонала ВА-2 от плотности

Заключение заряда в оболочку повышает пределы критической плотности. Так, заряд динамона в стеклянной оболочке, имеющий при диаметре 15 *мм* критическую плотность 0,71 *г/см*³, устойчиво детонирует в массивной железной оболочке при плотности 1,07 *г/см*³.

В табл. 7 показано влияние повышения плотности заряда на скорость детонации однородных химических взрывчатых соединений. Приведенные результаты были получены для зарядов, заключенных в прочные оболочки.

Таблица 7

Влияние изменения плотности зарядов на скорость детонации однородных химических взрывчатых соединений

Тротил		Тетрил		Гексоген, флегматизированный 5% парафина	
плотность, *г/см*³	скорость детонации, *м/сек*	плотность, *г/см*³	скорость детонации, *м/сек*	плотность, *г/см*³	скорость детонации, *м/сек*
0,70	3610	0,96	5350	1,25	6660
1,00	4720	1,22	6290	1,30	6875
1,16	5360	1,68	7740	1,35	7125
1,49	6640	—	—	1,40	7315
1,62	6990	—	—	1,45	7470
—	—	—	—	1,50	7690
—	—	—	—	1,55	7820
—	—	—	—	1,60	7995

Существенное влияние плотность оказывает и на возможность перехода горения ВВ в детонацию. Согласно гипотезе К. К. Андреева переход горения в детонацию осуществляется тем легче, чем более пористым (газопроницаемым) является ВВ. В определенных условиях при достаточно глубоком проникновении продуктов горения в слой ВВ возможна вспышка взвешенной в газах части ВВ, способная возбудить детонацию заряда взрывчатого вещества. Высокой плотностью и практически отсутствием пористости объясняется меньшая ве-

роятность перехода горения в детонацию у литого тротила или желатинированного пироксилина по сравнению с порошкообразным тротилом или нежелатинированным пироксилином.

Физическое состояние ВВ. На способности ВВ к детонации также сказывается изменение их физического состояния. Наибольшей детонационной способностью обладают порошкообразные и прессованные ВВ. Взрывчатые вещества в жидком и плавленом состояниях отличаются пониженной детонационной способностью. Влияние изменения физического состояния тротила на его детонационную способность в зарядах малого диаметра показано в табл. 8.

Таблица 8

Способность к детонации тротиловых зарядов в различном физическом состоянии

Агрегатное состояние тротила	Плотность заряда, $г/см^3$	Температура заряда, град.	Диаметр заряда, *мм*	Инициатор	Характер детонации
Жидкость . . .	1,46	+100	10,0	20 *г* тэна	Отказ
Прессованный порошок . .	1,46	—180	10,0	Капсюль-детонатор № 8	Полная детонация со скоростью 6600 *м/сек*
Литой заряд .	1,64	+ 20	10,0	20 *г* тэна	Отказ

Влияние мощности инициатора на устойчивость детонации заряда. Устойчивая детонация в заряде взрывчатого вещества может быть вызвана только инициатором достаточной мощности. Для возбуждения детонации грубоизмельченных аммонитов, ВВ, содержащих флегматизирующие примеси, а также зарядов повышенной плотности иногда требуется применение более мощных, чем капсюль-детонатор № 8 средств инициирования.

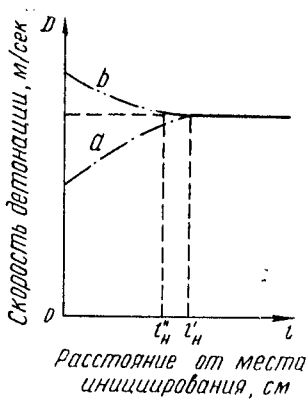


Рис. 26. Схема развития процесса взрывчатого превращения на начальном участке заряда

Увеличение мощности инициатора выше необходимого предела не может изменить скорости детонации самого заряда. Нельзя также повышением мощности инициатора вызвать устойчивую детонацию заряда с диаметром ниже критического или плотностью выше критической.

Изменение мощности инициатора может лишь оказать некоторое влияние на длину участка заряда, на котором устанавливается скорость распространения взрывчатого превращения, равная скорости детонации.

Скорость детонации инициатора может быть выше и ниже скорости детонации инициируемого ВВ. В непосредственной близости от инициатора в инициируемом заряде возбуждается взрывчатое

превращение, распространяющееся со скоростью, примерно равной скорости детонации инициатора. Затем на сравнительно небольшом участке заряда скорость взрывчатого превращения снижается (кривая *b* на рис. 26) или повышается (кривая *a*), достигая скорости детонации, присущей инициируемому ВВ в данных условиях взрывания. Длина участка заряда, на котором скорость взрывчатого разложения достигает характерной для данного ВВ скорости детонации (участок $Ol'_н$), обычно бывает невелика, но в зависимости от свойств ВВ и характеристик заряда меняется в пределах от нескольких миллиметров до нескольких сантиметров.

ГЛАВА VI

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЕТОНАЦИОННОЙ СПОСОБНОСТИ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ

Промышленные взрывчатые вещества должны обладать такой детонационной способностью, чтобы при инициировании одного из патронов удлиненного заряда ВВ, состоящего из нескольких (5—10 шт.) патронов стандартного диаметра (32—36 *мм*) и даже разделенных между собой небольшими воздушными промежутками или прослойками породы, безотказно взрывался весь заряд ВВ.

Как уже говорилось, детонационная способность ВВ находится в обратной зависимости от их критического диаметра. Следовательно, чем больше диаметр заряда ВВ, тем лучше условия для распространения детонации.

Лучшей детонационной способностью, т. е. способностью устойчиво детонировать в зарядах минимального диаметра, обладают те ВВ, у которых при прочих равных условиях выше восприимчивость к взрыву другого заряда ВВ или средств взрывания и больше запас энергии. Повышение плотности ВВ при неизменном стандартном диаметре заряда, как правило, затрудняет прохождение детонации по заряду.

Помещение заряда в оболочку облегчает условия детонации. Даже соединением бумажной трубкой двух патронов можно увеличить расстояние, на которое будет передаваться детонация при инициировании одного из патронов. Однако такое влияние оболочки наблюдается только в том случае, когда она плотно прилегает к заряду. При наличии зазора в несколько миллиметров между стенкой оболочки и зарядом, оболочка может, по наблюдениям С. И. Рудаковского, оказать и отрицательное влияние. В этом случае ударная волна или газообразные продукты взрыва, распространяясь в зазоре, могут обгонять волну детонации и производить сжатие заряда впереди фронта детонации. Удлиненные заряды ВВ, обладающие пониженной восприимчивостью, способностью к переуплотнению и большим критическим диаметром, в этих условиях дают затухание детонации.

Аналогичное явление наблюдается и в шпурах. Поэтому ВВ, применяемые в шпурах в патронированном виде, должны обладать хорошей детонационной способностью.

Условия прохождения детонации по удлиненному заряду ВВ, помещенному в шпуры или скважины россыпью, сравнительно более легкие и к ВВ, подлежащим заряжанию только россыпью, не предъявляют таких высоких требований по передаче детонации, как к ВВ, применяемым в патронах.

В практических условиях использования промышленных ВВ их детонационную способность характеризуют способностью к передаче детонации на расстояние, критическим диаметром и скоростью детонации, а в отдельных случаях также полнотой детонации в стальных трубах с зазором между зарядом и стенками трубы.

Скорость детонации и критический диаметр обычно определяют при разработке новых сортов и использовании нестандартных ВВ.

Способность ВВ к передаче детонации обязательно проверяют на заводе у каждой выпускаемой партии ВВ, а на местах применения — после окончания гарантийного срока хранения и во всех случаях, когда качество ВВ вызывает сомнение.

Испытание на передачу детонации. Испытание ВВ на способность к передаче детонации на расстояние является одним из самых простых испытаний, легко выполнимым и в то же время весьма показательным, отражающим свойства ВВ и качество их приготовления.

Испытание ВВ на передачу детонации заключается в следующем. Два патрона укладывают на твердом грунте (лучше с подсыпкой слоя песка толщиной 2—3 *см*) так, чтобы патроны были расположены строго по оси, но находились на некотором расстоянии друг от друга (рис. 27). Плотность, вес и размеры патронов должны быть

Рис. 27. Схема подготовки заряда к испытанию на передачу детонации между патронами: *а* — активный патрон; *в* — пассивный патрон; *S* — расстояние между патронами

такими, какие приняты при использовании данного ВВ. Один из патронов служит боевиком и снабжен зажигательной трубкой или электродетонатором. Этот патрон называют активным. Второй патрон, который должен детонировать под действием детонации активного патрона, называют пассивным

Затем производят взрыв и по наличию углубления в грунте на месте расположения патронов и по отсутствию остатков ВВ или оболочки устанавливают полноту или неполноту детонации обоих патронов. В зависимости от результатов опыта производят взрыв следующих патронов, расстояние между которыми увеличивают или

уменьшают на 1 *см*. Наибольшее расстояние в *см*, при котором наблюдается полная детонация обоих испытываемых патронов при трех параллельных опытах, считается расстоянием передачи детонации для данного ВВ.

На местах применения ВВ для сокращения количества опытов можно ограничиться проверкой только зафиксированного в ГОСТе для данного ВВ расстояния передачи детонации, которое на 1—2, а иногда и на 3 *см* меньше, чем могут показать хорошо приготовленные партии ВВ. Если же при испытании будет установлено, что ВВ не выдерживает расстояния, установленного стандартом, тогда определяют фактическое расстояние, на которое передается детонация, и, в зависимости от полученных результатов, принимают решение об условии использования этой партии ВВ или о ее непригодности.

Взрывчатые вещества, выпускаемые с заводов в мешках и предназначенные для применения россыпью, принято испытывать в патронах диаметром 31 ± 1 *мм* весом 200 ± 20 *г* при плотности 1,0—1,1 *г/см*^{3}. ВВ с пониженной детонационной способностью, но достаточной работоспособностью и различные отходы ВВ в некоторых случаях можно с успехом использовать на взрывных работах при применении их в зарядах большого диаметра.

О том, как зависит расстояние передачи детонации от изменения диаметра заряда, видно из следующих опытов. Из аммонита, содержащего 12% хлористого калия, были сделаны патроны разного диаметра весом по 300 *г*. При испытании оказалось, что если между патронами стандартного (31 *мм*) диаметра детонация передавалась на расстояние 5 *см*, то с увеличением диаметра до 40 *мм* передача детонации составила 11 *см*, при диаметре 50 *мм*—17 *см*, а при диаметре 60 *мм*—25 *см*.

Определение критического диаметра. В каждом отдельном случае применения ВВ с пониженной детонационной способностью следует определить критический диаметр с тем, чтобы использовать ВВ в условиях, обеспечивающих полноту детонации и максимальное выделение энергии.

Критический диаметр можно определить путем испытания ВВ на полноту детонации в патронах различного диаметра или путем взрывания в зарядах конической формы (рис. 28).

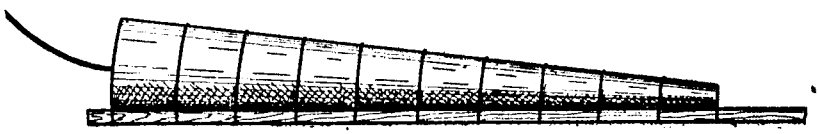


Рис. 28. Конический заряд ВВ для ориентировочного определения величины критического диаметра

В зависимости от восприимчивости ВВ инициирование патронов производят капсюлем-детонатором № 8 или промежуточным детонатором.

При испытании на полноту детонации патронов разного диаметра критическим считается тот минимальный диаметр, при котором бу-

дет установлена безотказная детонация в трех параллельных опытах. Расход ВВ на подбор критического диаметра таким способом велик, поэтому целесообразно путем испытания в конических патронах ориентировочно установить максимальный диаметр, при котором затухает детонация.

Полученный результат следует уточнить испытанием на полноту детонации зарядов цилиндрической формы.

Длина конусного патрона должна быть такой, чтобы угол наклона образующей конуса к его оси не превышал 4—5°.

Диаметр заряда, при котором происходит затухание детонации в конусном патроне, определяют по длине отпечатка на грунте от взрыва опытного патрона или по отметкам на остатке рейки, помещаемой под заряд перед взрывом, и по диаметру оставшейся после испытания части патрона.

Указанные способы определения критического диаметра ВВ не отличаются большой точностью, однако они позволяют судить о возможности использования ВВ на взрывных работах.

Определение скорости детонации. Скорость детонации является одной из основных характеристик ВВ и служит показателем полноты разложения и эффективности действия ВВ.

Скорость детонации зависит не только от природы и чистоты ВВ, но также и от диаметра заряда, плотности, величины кристаллов или частиц, влажности ВВ и ряда других физических факторов.

Данные о скорости детонации, приводимые в литературе, получены опытным путем в условиях, благоприятствующих нормальному развитию детонации опытных зарядов. Поэтому сопоставляя данные, приведенные в литературе, с полученными при испытании отдельных партий ВВ в условиях, близких к условиям применения (соответствующие диаметр и плотность заряда, влажность ВВ и пр.), можно сделать выводы о качестве и эффективности действия испытываемого ВВ.

Существует много методов определения скорости детонации взрывчатых веществ. Все их можно разделить в основном на две группы: к первой группе относятся методы, фиксирующие весь процесс детонации и дающие возможность определить скорость детонации в каждой точке по длине испытываемого заряда ВВ, а ко второй — методы, с помощью которых устанавливается средняя скорость детонации на каком-то отрезке заряда ВВ.

Для изучения свойств ВВ большой интерес представляют методы первой группы, позволяющие фиксировать изменение скорости детонации по длине заряда. Однако эти методы в настоящее время еще имеют ряд ограничений; так, например, они не применимы для фиксации скорости детонации зарядов, находящихся в грунте или в прочной непрозрачной оболочке.

Методы второй группы дают только средние величины скорости детонации, но позволяют регистрировать скорость детонации зарядов, находящихся в породе или в различных оболочках, что в ряде случаев представляет большой интерес для характеристики применяемых зарядов.

Каждый из этих методов имеет много вариантов в зависимости от применяемой аппаратуры и позволяет определять скорость детонации с большей или меньшей точностью.

Мы остановимся только на принципе действия некоторых приборов для определения скорости детонации и дадим описание пробы, которая с успехом может быть применена на местах использования промышленных взрывчатых веществ.

Приборы, фиксирующие процесс детонации на всей длине опытного заряда, основаны на фотозаписи свечения, сопутствующего распространению детонационной волны по заряду взрывчатого вещества. Такие приборы называют фоторегистрами.

В ряде приборов свечение записывают на фотопленку, помещенную во вращающемся с определенной скоростью барабане. Изображение фотографируемого процесса проектируется на пленку посредством объектива и призм с полным внутренним отражением. Скорость движения пленки или, как говорят, скорость развертки достигает 180 *м/сек*.

Наибольшее распространение получил скоростной зеркальный фоторегистр Института химической физики Академии наук СССР (СФР ИХФ). На этом приборе записывают свечение, сопровождающее детонацию, на неподвижную фотопленку, на которую оно отбрасывается плоским зеркалом, вращающимся с определенной скоростью. Такое устройство позволяет увеличить линейную скорость развертки и этим повысить точность измерений.

На пути светового потока, попадающего на зеркало, устанавливают линзы, которые дают возможность получить поток требуемой

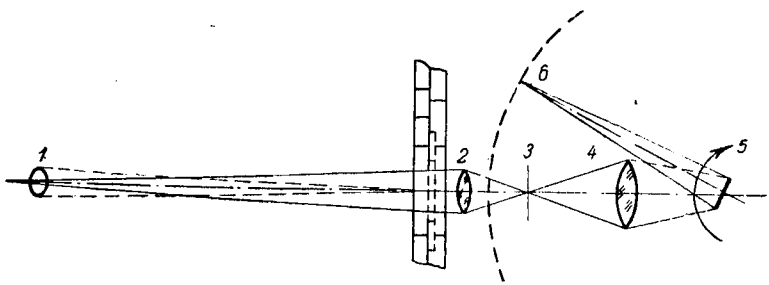


Рис. 29. Схема зеркальной фоторазвертки для определения скорости детонации: *1*—заряд; *2* и *4*—линзы; *3*—фокальная плоскость; *5*—вращающееся зеркало; *6*—фотопленка

светосилы при помещении заряда на достаточно большом расстоянии от записывающей части прибора. Заряд взрывают в бронекамере, имеющей смотровое окно с бронестеклом, через которое и проникает свечение. Схема прибора зеркальной фоторазвертки приведена на рис. 29.

На фотопленках приборов-разверток получают наклонный след свечения, образующийся в результате сложения движения волны

детонации в вертикальной плоскости и движения луча, отбрасываемого зеркалом в горизонтальной плоскости (рис. 30). На снимках, получаемых на зеркальной фоторазвертке, ось движения фронта детонации фиксируется перед взрывом съемкой положения заряда.

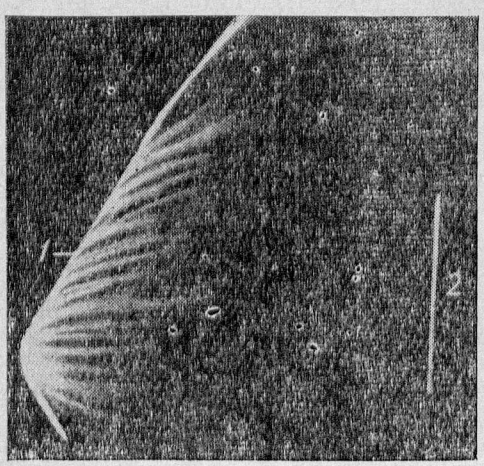


Рис. 30. Фотография взрыва заряда, полученная при помощи зеркальной фоторазвертки: *1* — след взрыва; *2* — ось заряда

Скорость движения фокуса луча по пленке на приборе зеркальной фоторазвертки зависит от угловой скорости зеркала и расстояния от зеркала до пленки. Если скорость движения луча и скорость распространения детонации по заряду постоянные, то на пленке будет получена наклонная линия. При изменении скорости детонации заряда наклон следа будет меняться.

Для определения скорости детонации измеряют угол наклона φ полученной кривой и производят расчет по формуле:

$$D = \frac{4\pi Rn}{\beta} \operatorname{ctg} \varphi,$$

где: R — расстояние от зеркала до пленки, *м*;
n — число оборотов зеркала в момент взрыва, об/сек;
β — коэффициент уменьшения прибора;
φ — угол между вертикальной осью и касательной к следу детонации, град.

Максимальная относительная ошибка определения скорости детонации на приборе зеркальной фоторазвертки составляет не более 1%.

Приборы, с помощью которых определяют среднюю скорость детонации, называют хронографами.

Хронографы разных систем, например прибор ОК-15-ИХФ Института химической физики, регистрируют промежуток времени, в течение которого детонационная волна проходит между двумя фиксированными точками испытываемого заряда ВВ, связанными с датчиками. Скорость детонации рассчитывают как среднюю на данном участке заряда ВВ (между фиксированными точками) по формуле равномерного движения:

$$D = \frac{l}{t},$$

где: l — длина участка ВВ между двумя точками, *м*;

t — время прохождения детонационной волны по измеренному участку заряда ВВ, зафиксированное хронографом, сек.

Датчиками, подающими импульс на хронограф при прохождении волны детонации через фиксированные точки заряда ВВ, могут быть разрывающиеся проволочки, замыкающие и размыкающие ток, и другие приспособления.

Проба с тарированным детонирующим шнуром (проба Дотриша). Простой, не требующей специальной аппаратуры, и в то же время достаточно точной при аккуратном выполнении является проба с применением тарированного детонирующего шнура.

В заряд испытуемого ВВ, длиной около 40 *см* и диаметром чаще всего 32 *мм*, на определенном расстоянии друг от друга (l=20—30 *см*) вводят два отрезка детонирующего шнура (ДШ). Отрезки ДШ берут длиной 1,5—3 *м*, при этом один отрезок должен быть на 30—40 *см* короче другого. Расстояние между точками введения отрезков ДШ и длину его измеряют с максимальной точностью. Скорость детонации применяемого ДШ должна быть заранее измерена каким-либо достаточно точным методом (шнур тарирован).

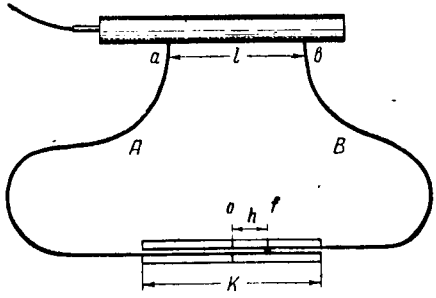


Рис. 31. Схема определения скорости детонации ВВ с помощью тарированного детонирующего шнура

Свободные отрезки ДШ укладывают на свинцовую или стальную пластинку толщиной 2—4 *мм* и длиной 30—40 *см* (K). На пластинке отмечают ее середину (O) и отрезки ДШ размещают так, чтобы концы их точно совпадали с концами пластинки (рис. 31). В один из концов испытываемого заряда вводят капсюль-детонатор или электродетонатор.

Во время взрыва заряда детонационная волна, дойдя до точки a, возбудит детонационную волну в отрезке A детонирующего шнура и дальше пойдет в двух направлениях — по заряду ВВ и по отрезку A.

Такая же картина получится и в момент прохождения детонационной волны в точке $в$. Детонационные волны, распространяясь по отрезкам ДШ, встретятся в какой-то точке f, и, создав мгновенное повышение давления, дадут характерное углубление на пластинке.

Зная длину l отрезка ВВ между точками ввода концов ДШ, скорость детонации ДШ ($D_{ДШ}$) и измерив на пластине расстояние h, можно рассчитать среднюю скорость детонации испытуемого ВВ ($D_{ВВ}$).

Очевидно, что время, в течение которого волна детонации пройдет от точки a до точки f, будет равно:

$$t_1 = \frac{A - \frac{K}{2} + h}{D_{ДШ}}.$$

Время прохождения волны детонации от точки a по заряду ВВ, а затем по ДШ до точки f будет равно:

$$t_2 = \frac{l}{D_{ВВ}} + \frac{B - \frac{K}{2} - h}{D_{ДШ}}.$$

Так как волны детонации встречаются в точке f, то $t_1 = t_2$.

Тогда

$$\frac{A - \frac{K}{2} + h}{D_{ДШ}} = \frac{l}{D_{ВВ}} + \frac{B - \frac{K}{2} - h}{D_{ДШ}}$$

или

$$\frac{A - B + 2h}{D_{ДШ}} = \frac{l}{D_{ВВ}}.$$

Следовательно, скорость детонации может быть рассчитана по формуле:

$$D_{ВВ} = \frac{l \cdot D_{ДШ}}{A - B + 2h} \text{ м/сек}.$$

В зависимости от цели испытания заряд ВВ может быть в порошкообразном, прессованном или в другом виде, в бумажной или металлической оболочке; кроме того, заряд можно размещать на открытом воздухе или в породе.

Точность определения скорости детонации по приведенной пробе может быть в пределах ±3%, что вполне достаточно для практических целей проверки качества ВВ.

Следует иметь в виду, что описанным методом определяют относительную скорость детонации ВВ. Вместо тарированного детонирующего шнура могут быть использованы заряды любого взрывчатого вещества, в которых точно известна скорость распространения детонации.

ЗАДАЧА

Вычислить скорость детонации ВВ, определяемой по методу с тарированными ДШ, если один отрезок ДШ равен 1,5 *м*, второй отрезок равен 1,2 *м*, скорость детонации ДШ составляет 7000 *м/сек*, расстояние между точками введения ДШ в заряд испытуемого ВВ равно 0,3 *м*, а расстояние от средней точки между концами ДШ до места встречи детонационных волн шнура (h) равно 7 *см*.

ГЛАВА VII

РЕАКЦИИ РАЗЛОЖЕНИЯ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ

Для теоретического расчета объема газообразных продуктов взрыва, теплоты и температуры взрывчатого превращения, а также для суждения о ядовитости продуктов взрыва необходимо иметь представление о химических реакциях, протекающих при взрыве.

Зная химический состав ВВ и пользуясь общими законами химии и термодинамики, можно с некоторым приближением теоретически рассчитать качественный и количественный состав продуктов взрыва.

В состав ВВ, представляющих собой в большинстве случаев органические вещества или смеси органических веществ с окислителями, содержатся обычно углерод, водород, кислород и азот. В результате взрыва образуется углекислый газ, вода, азот и другие продукты. Известны взрывчатые вещества, в составе которых нет кислорода, например азид свинца. Превращение азида свинца происходит с образованием элементарных свинца и азота:

$$PbN_6 = Pb + 3N_2.$$

Состав продуктов взрыва промышленных ВВ в значительной мере определяется их кислородным балансом.

КИСЛОРОДНЫЙ БАЛАНС ВВ

Кислородным балансом называют избыток или недостаток кислорода в веществе по сравнению с количеством, необходимым для полного окисления содержащихся в нем углерода, водорода и других способных к окислению при взрыве элементов (например, алюминия в составе аммоналов).

Кислородный баланс (табл. 9) выражают обычно в граммах не-

Таблица 9

Кислородный баланс некоторых веществ

Наименование вещества	Избыток или недостаток кислорода в 1 *г* вещества, *г*	Наименование вещества	Избыток или недостаток кислорода в 1 *г* вещества, *г*
Тетранитрометан	+ 0,490	Тетрил	— 0,474
Натровая селитра	+ 0,470	Пикрат аммония	— 0,520
Перхлорат калия	+ 0,462	Тротил	— 0,740
Калиевая селитра	+ 0,396	Алюминий	— 0,890
Хлорат калия	+ 0,392	Динитротолуол	— 1,144
Перхлорат аммония	+ 0,340	Бумага	— 1,300
Аммиачная селитра	+ 0,200	Древесная мука	— 1,370
Аммиачная селитра водоустойчивая	+ 0,190	Динитронафталин	— 1,394
Нитроглицерин	+ 0,035	Сфагнум	— 1,470
Нитрогликоль	0,000	Торф	— 1,532
Тэн	— 0,101	Лигнин	— 1,910
Гексоген	— 0,216	Уголь	— 2,667
Коллодионный хлопок (12,2% азота)	— 0,372	Стеарат кальция	— 2,750
Нитродиэтиленгликоль	— 0,408	Асфальтит	— 2,890
Пикриновая кислота	— 0,454	Парафин	— 3,460

достающего или избыточного кислорода на 1 *г* вещества. В том случае, если в веществе имеется избыточный кислород, кислородный баланс считается положительным (перед его численным выражением ставят знак плюс). Если для полного окисления углерода, водорода и металлических добавок, содержащихся в веществе, требуется добавка кислорода извне, кислородный баланс вещества считается отрицательным (перед его численным выражением ставят знак минус). Иногда содержание избыточного кислорода или его недостаток относят в граммах на 100 *г* ВВ и выражают в процентах.

Для вычисления кислородного баланса любого вещества или смеси вещества можно поступить следующим образом.

Вначале надо найти в веществе или в смеси веществ содержание элементов, выраженное в грамм-атомах на 100 *г* вещества или смеси. Для этого делят весовое содержание вещества в 100 *г* смеси на его молекулярный вес и полученное частное умножают на число атомов тех или иных элементов, содержащихся в молекуле вещества. Таким образом находят число грамм-атомов углерода, водорода, кислорода и азота от каждого компонента, содержащихся в 100 *г* смеси, и затем соответственно их суммируют.

Для пояснения в табл. 10 приводится расчет формулы 100 *г* аммонита № 6

Таблица 10

Расчет содержания грамм-атомов элементов в 100 *г* аммонита № 6

Наименование компонентов аммонита	Весовое содержание компонентов в 100 *г* смеси, *г*	Формулы компонентов	Молекулярный вес	Содержание компонентов в 100 *г* смеси, *г-моль*	Содержание, %, грамм атомов элементов в 100 г смеси			
					C	H	O	N
Аммиачная селитра . . .	79	NH_4NO_3	80	$\frac{79}{80} = 0{,}99$	—	3,95	2,96	1,98
Тротил . .	21	$C_7H_5O_6N_3$	227	$\frac{21}{227} = 0{,}0925$	0,65	0,46	0,55	0,28
Элементарный состав 100 *г* аммонита № 6					0,65	4,41	3,51	2,26

Таким образом, можно найти элементарный состав 100 *г* любого ВВ, который в общем виде выражается формулой $C_aH_bO_cN_d$

Для вычисления кислородного баланса ВВ по элементарному составу воспользуемся следующими соображениями.

Для сгорания каждого атома углерода по уравнению $C+2O=CO_2$ требуется два атома кислорода. Поэтому на *a* грамм-атомов углерода потребуется 2 *a* грамм-атомов кислорода. Для сгорания *b* грамм-атомов водорода по уравнению $H+{}^1/_2O={}^1/_2H_2O$ потребуется *b*/2 грамм-атомов кислорода. Таким образом, для сгорания углерода и водорода, содержащихся в 100 *г* смеси, требуется $2a+b/2$ грамм-атомов кислорода. Но в составе вещества имеется собственный кислород в количестве *c* грамм-атомов, поэтому количество кислорода, недостающее для полного сгорания углерода и водорода, будет равно: $-(2a+b/2-c)$. При $c<(2a+b/2)$ знак перед численным значением указывает на то, что вещество имеет отрицательный кислородный баланс. Если $c>(2a+b/2)$, то алгебраическая сумма после раскрытия скобок будет положительной. Это указывает на то, что кислородный баланс вещества положительный.

Выражая кислородный баланс (КБ) в граммах на 1 *г* вещества, получаем:

$$КБ = -\frac{16}{100}(2a + b/2 - c) \ г/г,$$

где множитель 16 — атомный вес кислорода.

Для примера произведем расчет кислородного баланса аммонита № 6 по данным элементарного состава, указанного в табл. 10. Формула 100 *г* аммонита $C_{0,65}H_{4,41}O_{3,51}N_{2,26}$

$$КБ = -\frac{16}{100}(2 \cdot 0,65 + 1/2 \cdot 4,41 - 3,51) = 0.$$

Если в состав ВВ входит алюминий в количестве *c* грамм-атомов на 100 *г* смеси, формула для расчета кислородного баланса примет вид:

$$КБ = -\frac{16}{100}(2a + b/2 + 3/2e - c).$$

Подсчет кислородного баланса ВВ значительно упрощается, если ВВ состоит из компонентов, кислородный баланс каждого из которых известен. В этом случае число, характеризующее кислородный баланс компонента, умножают на весовое содержание его в 100 *г* смеси, после чего полученные для каждого компонента данные с соответствующими знаками (+ или —) алгебраически складывают. Для отнесения на 1 *г* вещества результат делят на 100.

Пример 1. Найти кислородный баланс аммонита, содержащего аммиачной селитры 71, тротила 18, нитрата калия 10, асфальтита 0,8 и парафина 0,2%.

По данным табл. 9 кислородный баланс компонентов следующий: аммиачная селитра +0,2; тротил—0,74; нитрат калия+0,396; асфальтит—2,89; парафин—3,46.

Кислородный баланс аммонита

$$КБ = \frac{+0,2 \cdot 71 - 0,74 \cdot 18 + 0,396 \cdot 10 - 2,89 \cdot 0,8 - 3,46 \cdot 0,2}{100} = +0,019 \ г/г.$$

Пример 2. Рассчитать состав аммонала, содержащего водоустойчивую селитру, тротил и 4,5% алюминия, чтобы кислородный баланс смеси был нулевым.

По табл. 9 находим кислородный баланс компонентов: у водоустойчивой селитры +0,19; у тротила—0,74; у алюминия—0,89.

Обозначим содержание тротила через x, а содержание селитры через y. Тогда $y = 100 - 4,5 - x = 95,5 - x$.

Алгебраическая сумма произведений содержания каждого компонента на его кислородный баланс при нулевом кислородном балансе смеси должна равняться нулю:

$$+0,19(95,5 - x) - 0,74x - 0,89 \cdot 4,5 = 0;$$
$$18,15 - 0,19x - 0,74x - 4,01 = 0;$$
$$0,93x = 14,14; \quad x = 15,2; \quad y = 95,5 - 15,2 = 80,3.$$

Таким образом, аммонал должен содержать:

водоустойчивой селитры—80,3%;
тротила — 15,2%;
алюминия—4,5%.

Для теоретического расчета состава продуктов взрыва целесообразно взрывчатые вещества подразделить на три группы, в зависимости от их кислородного баланса.

К первой группе относятся ВВ с положительным или нулевым кислородным балансом; ко второй — ВВ с отрицательным кислородным балансом, в продуктах взрыва которых нет твердого углерода; к третьей—ВВ, в продуктах взрыва которых содержится твердый углерод.

ВВ с положительным или нулевым кислородным балансом. Составление реакций взрывчатого превращения для этой группы веществ наиболее просто.

Из всех возможных в этом случае химических превращений наиболее вероятными являются те, при которых выделяется максимальное количество теплоты. Именно поэтому реакция углерода с кислородом идет до образования углекислого газа, водород сгорает, образуя воду, а азот выделяется в элементарном виде (так как реакции окисления азота идут с поглощением тепла).

Расчет реакции превращения ВВ с нулевым или с положительным кислородным балансом можно пояснить на следующих примерах.

Уравнение взрывчатого превращения молекулы нитроглицерина, исходя из указанного выше, будет следующим:

$$C_3H_5(ONO_2)_3 = 3CO_2 + 2{,}5H_2O + 0{,}25O_2 + 1{,}5N_2.$$

Для составления уравнения взрывчатого превращения аммонита № 6 воспользуемся формулой, рассчитанной выше (см. табл. 10). При полном окислении углерода и водорода реакция должна выразиться следующим уравнением:

$$C_{0,65}H_{4,41}O_{3,51}N_{2,26} = 0{,}65CO_2 + 2{,}21H_2O + 1{,}13N_2.$$

Таким образом, в том случае, когда вещество имеет нулевой кислородный баланс, в продуктах взрыва не должно быть ни окиси углерода, ни свободного кислорода.

Однако практически продукты взрывчатого превращения веществ с нулевым кислородным балансом, особенно смесевых, в зависимости от условий взрывания могут содержать, кроме углекислоты и воды, некоторое количество продуктов неполного окисления, о причинах образования которых будет сказано ниже.

К группе взрывчатых веществ с положительным или нулевым кислородным балансом относится нитроглицерин, нитрогликоль и большинство промышленных ВВ.

ВВ с отрицательным кислородным балансом, не образующие при взрыве твердого углерода. К числу ВВ этой группы относят тэн и гексоген при плотности 1,7—1,8 *г/см*^{3} и амматолы с большим содержанием тротила (например, с 50%).

Реакции взрывчатого разложения ВВ этой группы характеризуются тем, что наряду с углекислым газом и водой при взрыве образуются окись углерода и элементарный водород. Кроме того, образуются небольшие количества метана и других углеводородов. При теоретическом составлении реакций взрывчатого разложения ВВ здесь приходится решать вопрос о распределении кислорода на образование CO_2, CO и H_2O.

При одновременном наличии CO_2, CO, H_2O и H_2 в продуктах взрыва в зависимости от температуры устанавливаются определенные соотношения этих газообразных компонентов согласно равновесию по реакции образования так называемого водяного газа:

$$CO + H_2O \rightleftarrows CO_2 + H_2.$$

При повышении температуры реакция сдвигается влево, а при понижении — вправо.

Для каждой температуры устанавливается определенное отношение K из произведений концентраций продуктов левой и правой частей уравнения:

$$K = \frac{CO \cdot H_2O}{CO_2 \cdot H_2}.$$

Несмотря на крайне быстрое течение реакций взрывчатого превращения, термодинамическое равновесие в газообразных продуктах взрыва успевает установиться, потому что скорости реакций между газообразными продуктами при высокой температуре и высоком давлении огромны.

Однако в процессе охлаждения продуктов взрыва состояние равновесия является подвижным лишь до некоторого предела. Так как скорость равновесных реакций при охлаждении уменьшается, то при некоторой температуре она может не обеспечить состояния подвижного равновесия при данной скорости охлаждения газов. В этот момент равновесие станет ложным и произойдет «закалка» равновесия (рис. 32), т. е. при дальнейшем охлаждении состав продуктов взрыва остается неизменным. Практически «закалка» равновесия продуктов взрыва в зависимости от условий взрыва происходит при температурах, довольно близких к температурам взрыва.

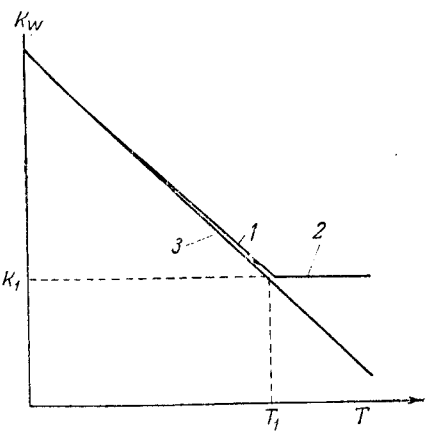


Рис. 32. Схема изменения константы равновесия продуктов взрыва в процессе охлаждения их в бомбе после взрыва: *1* — подвижное равновесие в процессе охлаждения; *2* — ложное равновесие; *3* — равновесие в статических условиях изменения температуры; K_1 — соотношение $\frac{CO \cdot H_2O}{CO_2 \cdot H_2}$ в охлажденных продуктах взрыва; T_1 — температура закалки равновесия

Для ориентировочного составления уравнений взрывчатого превращения ВВ второй группы принимают, что кислород, входящий в состав молекул ВВ, сначала окисляет весь водород в воду и углерод в окись углерода, а затем оставшаяся часть кислорода реагирует с окисью углерода, образуя углекислый газ.

Следуя этому правилу, рассчитаем в качестве примера уравнение разложения тэна.

Условный промежуточный состав продуктов взрыва должен быть следующим:

$$C(CH_2ONO_2)_4 = C_5H_8O_{12}N_4 = 5CO + 4H_2O + 3O + 2N_2.$$

Неизрасходованные на окисление углерода в окись углерода три атома кислорода идут на окисление окиси углерода в углекислый газ и тогда уравнение принимает следующий вид:

$$C(CH_2ONO_2)_4 = 3CO_2 + 2CO + 4H_2O + 2N_2.$$

Уточненный расчет реакций взрывчатого разложения ВВ второй группы может быть сделан с учетом равновесия продуктов при температуре взрыва по реакции водяного газа. Для упрощения расчета принимают, что в составе продуктов взрыва содержится лишь CO, CO_2, H_2, H_2O и N_2. Реакция разложения ВВ, условно выраженного формулой $C_aH_bO_cN_d$, в общем виде примет вид:

$$C_aH_b\,O_cN_d = xCO + yCO_2 + zH_2 + uH_2O + \frac{d}{2}\,N_2.$$

Очевидно, $x+y=a$; $2z+2u=b$; $x+2y+u=c$.

Для определения четырех неизвестных необходимо четвертое уравнение, которое может быть составлено из условия равновесия продуктов взрыва по реакции водяного газа:

$$xCO + uH_2O \rightleftarrows yCO_2 + zH_2,$$

а именно:

$$\frac{x \cdot u}{y \cdot z} = K.$$

Величина K зависит от температуры и может быть вычислена по формулам, приводимым в курсах термодинамики, или взята из соответствующих таблиц.

Температуру взрыва вначале находят по тепловому эффекту реакции, составленной приближенно, а затем уточняют.

В качестве примера уточним реакцию разложения тэна, написанную выше по приближенному расчету. Можно показать специальным расчетом, о котором будет сказано дальше, что для приведенного уравнения температура взрыва составляет 4000°. При этой температуре константа равновесия водяного газа равна 20.

Суммируя содержание элементов в правой части уравнения, находим:

$x + y = 5$ (количество атомов углерода);

$2z + 2y = 8$ (количество атомов водорода);

$x + 2y + u = 12$ (количество атомов кислорода);

$\frac{x \cdot u}{y \cdot z} = 20$ (отношение произведения концентраций продуктов левой части уравнения водяного газа к произведению концентраций продуктов в правой части этого уравнения).

Решая систему уравнений, находим: $x = 1{,}88$; $y = 3{,}12$; $z = 0{,}12$; $u = 3{,}88$.

Таким образом, уточненное уравнение имеет следующий вид:

$$C(CH_2ONO_2) = 1{,}88CO + 3{,}12CO_2 + 0{,}12H_2 + 3{,}88H_2O + 2N_2.$$

Этой реакции соответствует уже иной тепловой эффект, иная температура взрыва и, следовательно, новое значение K. Повторяя расчеты с новым значением K, можно составить реакцию еще более точно.

ВВ с отрицательным кислородным балансом, образующие при взрыве твердый углерод. Приближенно реакции взрывчатого разложения ВВ этой группы можно составить, предположив, что весь кислород в ВВ сначала окисляет водород в воду, а затем оставшаяся часть кислорода реагирует с углеродом, сбразуя окись углерода. Избыточное количество углерода выделяется в элементарном виде.

К числу ВВ третьей группы относится тротил. Приближенно составленная реакция разложения тротила выглядит следующим образом:

$$CH_3C_6H_2(NO_2)_3 = 2{,}5H_2O + 3{,}5CO + 3{,}5C + 1{,}5N_2.$$

Для уточненного составления реакций взрывчатого превращения третьей группы ВВ следует принимать во внимание равновесную реакцию между продуктами взрыва:

$$2CO \rightleftarrows C + CO_2^*.$$

Расчет уточненных реакций взрывчатого разложения ВВ третьей группы еще более сложен, чем для ВВ второй группы, так как в этом случае приходится учитывать не только температуру взрыва, но также и давление. В настоящем курсе этот расчет опускается.

Практически при взрыве ВВ с сильно отрицательным кислородным балансом, помимо окиси углерода, воды, твердого углерода и элементарного азота, образуются двуокись углерода, водород, метан, непредельные углеводороды, синильная кислота, аммиак, а иногда и окислы азота. Количественные соотношения этих веществ в продуктах взрыва зависят от плотности ВВ и условий взрывания.

ЗАДАЧИ

1. Найти элементарный состав 100 *г* смеси, состоящей из 10% клетчатки ($C_6H_{10}O_5$) и 90% аммиачной селитры, и вычислить кислородный баланс смеси по ее элементарному составу.
2. По данным табл. 9 вычислить кислородный баланс смеси следующего состава (%): перхлората калия—50, аммиачной селитры—25, тротила—25.
3. Составить уравнение взрывчатого разложения нитроглицерина.
4. Найти элементарный состав смеси, состоящей из 60% аммиачной селитры и 40% тротила, и составить приближенное уравнение взрывчатого разложения 100 *г* этой смеси.

ГЛАВА VIII

ОБЪЕМ И СОСТАВ ГАЗООБРАЗНЫХ ПРОДУКТОВ РАЗЛОЖЕНИЯ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ

Определение объема газообразных продуктов взрыва важно для оценки работоспособности ВВ. Превращение энергии ВВ в механическую работу происходит тем полнее, чем больше газов выделяется при взрыве.

Знание состава газообразных продуктов взрыва позволяет установить возможность применения ВВ при подземных взрывных работах. Взрывчатые вещества, в продуктах взрыва которых содержится большое количество окиси углерода (CO) и окислов азота (NO и NO_2), не допускают к применению в шахтах из-за ядовитости этих газов. Следует, однако, заметить, что двуокись азота может образоваться в продуктах взрыва главным образом в процессе охлаждения последних, так как при температуре выше 600° дву-

* Эта равновесная реакция имеет большое значение в процессе выплавки чугуна в доменных печах и поэтому носит название реакции доменного газа.

окись азота полностью диссоциирует на окись азота и кислород (рис. 33).

Для вычисления количества ядовитых газов по данным газового анализа необходимо знать удельный объем газообразных продуктов взрыва, т. е. объем, отнесенный к 1 *кг* ВВ.

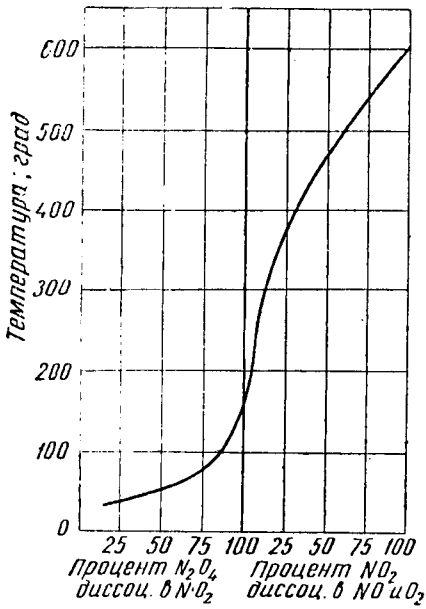


Рис. 33. Зависимость диссоциации двуокиси азота от температуры

Объем газообразных продуктов взрыва может быть найден теоретически по реакции разложения ВВ и практически путем измерения объема и давления газов после взрыва навески ВВ в стальной, не разрушающейся при взрыве, бомбе.

Расчет объема газообразных продуктов взрыва. Если составить реакцию взрывчатого разложения 1 *кг* ВВ, то объем газообразных продуктов, приведенный к нормальным условиям (при 0° и давлении 760 *мм* рт. ст.) и отнесенный к 1 *кг* ВВ, нетрудно вычислить по формуле:

$$V = 22{,}4 \cdot n_к \ л/кг,$$

где: 22,4—объем грамм-молекулы газа, *л*;

$n_к$ — количество молей газообразных продуктов, получающихся при взрыве 1 *кг* ВВ.

Если реакция составлена на одну или несколько молекул исходного вещества, то расчет объема газов следует производить по формуле:

$$V = \frac{22{,}4 \cdot n \cdot 1000}{N \cdot M} \ л/кг,$$

где: n — число газообразных молекул, получающихся по реакции;

N — число молекул исходного вещества, участвующих в реакции;

M — молекулярный вес исходного вещества.

Пример 1. Определить объем газообразных продуктов взрыва аммонита № 6, считая воду газообразной.

В предыдущей главе был подсчитан элементарный состав 100 *г* аммонита № 6. Этот состав отвечает формуле $C_{0,65}H_{4,41}O_{3,51}N_{2,26}$. Уравнение разложения 1 *кг* аммонита можно написать так:

$$C_{6,5}\ H_{44,1}\ O_{35,1}\ N_{22,6} = 6{,}5CO_2 + 22{,}1H_2O + 11{,}3N_2.$$

Удельный объем газообразных продуктов:

$$V = 22{,}4\,(6{,}5 + 22{,}1 + 11{,}3) = 893{,}76 \ л/кг.$$

Пример 2. Определить объем газообразных продуктов взрыва нитроглицерина.

Из уравнения реакции

$$2C_3H_5(ONO_2) = 6CO_2 + 5H_2O + 3N_2 + 0{,}5O_2$$

определяем удельный объем (на 1 *кг* ВВ):

$$V = \frac{22{,}4(6+5+3+0{,}5)\cdot 1000}{2\cdot 227} = 716 \text{ } л/кг.$$

Опытное определение объема газообразных продуктов взрыва. Для опытного определения объема и состава продуктов взрыва производят взрыв некоторого количества ВВ в стальной бомбе (Бихеля или Долгова) или калориметрической. Обычно допускается взрыв в бомбе заряда ВВ весом около 100 *г*. Объем образовавшихся при взрыве газов определяют, измеряя давление в бомбе после взрыва.

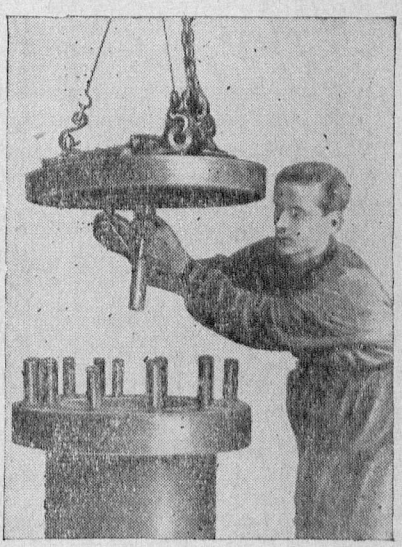


Рис. 34. Бомба Долгова

Применяемые для указанной цели стальные бомбы представляют собой толстостенные цилиндры с массивными крышками, герметично закрывающимися с помощью болтов и гаек. На крышках или на теле бомб имеются вентили для откачки воздуха перед взрывом и для замера давления внутри бомбы. Кроме того, имеется прилив с отверстием для термометра, по которому измеряют температуру бомбы. Внутри бомб сделаны приспособления для присоединения концов проводов электродетонаторов, с помощью которых производится взрыв заряда ВВ. Внутренний объем бомб бывает разный, чаще всего от 15 до 50 *л*, но бывают бомбы и меньшего размера. Общий вид 50-литровой бомбы Долгова изображен на рис. 34.

Перед взрывом из бомбы выкачивают воздух и замеряют остаточное его давление.

При охлаждении газообразных продуктов, образовавшихся при взрыве, вода конденсируется, поэтому в определяемый экспериментально объем газов вода не входит.

Объем сухих газообразных продуктов, полученных при нормальных условиях на 1 *кг* ВВ, вычисляют по формуле:

$$V_г = \frac{V_б(P-w)\cdot 273\cdot 1000}{760\cdot T\cdot a} \text{ } л/кг,$$

где: $V_г$ — суммарный объем образовавшихся при взрыве газов при атмосферном давлении и 0°, *л/кг*;

$V_б$—объем бомбы, *л*;

P —абсолютное давление в бомбе после взрыва, за вычетом остаточного давления перед взрывом, *мм*;

w—упругость водяных паров, насыщающих воздух при температуре $T°$;

T —абсолютная температура тела бомбы в момент замера давления, град.;

a —вес испытуемого заряда, *г*.

Практически перед взрывом определяют разрежение в бомбе (в *мм* рт. ст.), а после взрыва—избыточное давление против атмосферного. Так как абсолютное давление равно сумме избыточного и атмосферного, а остаточное давление в бомбе равно разности между атмосферным и давлением разрежения (вакуумом), то, согласно определению,

$$P = (P_{изб} + P_{атм}) - (P_{атм} - P_{разр}) = P_{изб} + P_{разр}.$$

К вычисленному объему газов следует добавить объем водяных паров, образующихся при взрыве.

Для учета объема паров воды определяют количество образовавшейся в бомбе воды путем продувания бомбы сухим воздухом с последующим поглощением влаги в хлоркальциевых трубках или вымораживанием ее.

Объем паров воды, приведенный к нормальным условиям, вычисляют по формуле:

$$V_в = \frac{22{,}4 \cdot b \cdot 100}{18 \cdot a} \quad л/кг,$$

где: b—найденное количество воды, *г*;

a — вес заряда ВВ в бомбе, *г*;

18 — молекулярный вес воды.

Суммарный объем газообразных продуктов взрыва получается равным

$$V = V_г + V_в \quad л/кг.$$

Объемы газообразных продуктов взрыва некоторых ВВ, найденные экспериментально, приведены в табл. 11.

Таблица 11

Объемы газообразных продуктов взрыва некоторых ВВ

Наименование ВВ	Плотность, $г/см^3$	Удельный объем газообразных продуктов взрыва при нормальных условиях	
		вода жидкая	вода—газ
Тротил	1,5	610	750
Тетрил	1,55	620	740
Гексоген	1,5	700	890
Тэн	1,65	550	790
Аммонал 80/20	0,7	300	720
Аммонит № 6	1,3	430	890
То же	0,9	430	880

В тех случаях, когда объем газообразных продуктов в бомбе замеряется с целью определения количества ядовитых газов, образующихся при взрыве, расчет объема должен производиться несколько иначе, чем описано выше.

Так как воздух, оставшийся после откачки из бомбы перед взрывом, разбавляет продукты взрыва и снижает процентное содержание ядовитых газов, то для нахождения объема ядовитых газов нужно брать в расчет не только объем образовавшихся при взрыве газов, но также и объем воздуха, находившегося в бомбе перед взрывом. Поэтому из абсолютного давления газов после взрыва не следует вычитать остаточное давление воздуха перед взрывом.

Расчетное давление в этом случае равно:

$$P = P_{изб} + P_{атм}.$$

Если перед испытанием воздух из бомбы откачен до глубокого вакуума, то различие между первым и вторым методами определения объема исчезает, так как $P_{разр} \cong P_{атм}$. Если же заряд взрывают в неэвакуированной бомбе или при недостаточно большом вакууме, ошибка в определении количества ядовитых газов при вычислении объема по первой формуле может стать очень большой. Практически всегда следует стремиться к созданию максимального вакуума в бомбе. В противном случае воздух в бомбе может взаимодействовать с продуктами взрыва, окисляя образующуюся при взрыве окись азота до двуокиси, чем обусловливается существенное осложнение газового анализа и неточность результатов вследствие растворения двуокиси азота в образующейся при взрыве воде.

При испытании ВВ на образование ядовитых газов в стальной бомбе поправку на упругость водяных паров при вычислении объема делать не следует, так как такой поправки обычно не делают при анализе газов. Замер объема газов в газовой бюретке при их анализе производят приблизительно при такой же температуре, как и замер давления в бомбе. Ошибки, возникающие вследствие неучета давления водяных паров в обоих случаях, взаимно компенсируются.

Таким образом, формула для расчета объемов газов в бомбе в тех случаях, когда это производится с целью определения количества ядовитых газов, должна быть следующей:

$$V_0' = \frac{V_0 (P_{изб} + P_{атм}) \cdot 273 \cdot 1000}{760 \cdot T \cdot a} \quad л/кг,$$

где: V_0' — суммарный объем газообразных продуктов и остаточного воздуха в бомбе на 1 *кг* ВВ при нормальных условиях, *л/кг*;

$P_{изб}$ — избыточное против атмосферного давление в бомбе после взрыва, *мм*;

$P_{атм}$ — атмосферное давление, *мм*.

Состав газообразных продуктов взрыва. Ядовитые газы. Состав газообразных продуктов взрыва определяется при помощи газового анализа, основанного на последовательном поглощении газов различными поглотителями. После пропускания газа через каждый поглотитель определяют уменьшение объема, по которому судят о количестве того или иного газа в смеси.

Анализ производят в газоанализаторе (рис. 35), состоящем из нескольких пипеток с растворами поглотителей, измерительной бюретки и грушевидного сосуда для сжигания газа, соединенных между собой стеклянной гребенкой. Перевод газа из бюретки через раствор поглотителя в пипетку и обратно производится поднятием или опусканием сообщающегося с бюреткой сосуда, наполненного ртутью, вытесняющей газ из бюретки или засасывающей его из пипетки.

В качестве поглотителей применяют для углекислого газа раствор щелочи, для окиси азота—раствор сернокислого железа, для кислорода—пирогаллол, для окиси углерода—аммиачный раствор полухлористой меди. Водород и метан находят путем определения уменьшения объема после сжигания газа в смеси с воздухом в грушевидном сосуде при пропускании электрического тока через платиновую спираль и поглощения образовавшегося при сжигании метана углекислого газа. Содержание азота вычисляют по разности начального объема смеси и объема других газов, составляющих смесь.

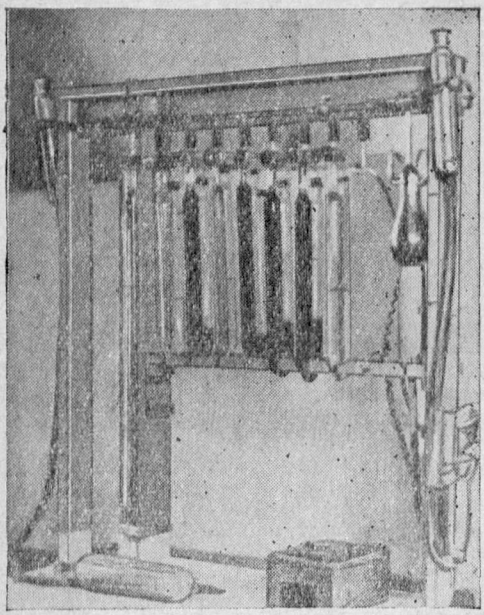


Рис. 35. Газоанализатор

Содержание газов в смеси (С) выражают в процентах, а затем перечисляют на объемные единицы, отнесенные к 1 *кг* ВВ по формуле:

$$V_x = V_0 \cdot \frac{C}{100} \ л/кг,$$

где: V_x—количество данного газа, *л* на 1 *кг* ВВ;
V_0—суммарный объем газов при нормальных условиях, *л/кг*;
C—содержание данного газа в смеси, %.

Пример. При взрывании аммонита № 6 в бомбе Бихеля в бумажной оболочке объем газов (жидкая вода) был найден равным 440 *л/кг*. По данным газового анализа в газе содержится: CO_2—20%; CO—12%; H_2—6%; CH_4—1,5%; N_2—61,5%.

Какое количество этих газов образуется при взрыве 1 *кг* аммонита?

Решение:

$$V_{CO_2} = 440 \cdot \frac{20}{100} = 88{,}0 \ л/кг;$$

$$V_{CO} = 440 \cdot \frac{12}{100} = 52{,}8 \ л/кг;$$

$$V_{H_2} = 440 \cdot \frac{6}{100} = 26{,}4 \ л/кг;$$

$$V_{CH_4} = 440 \cdot \frac{1{,}5}{100} = 6{,}6 \ л/кг;$$

$$V_{N_2} = 440 \cdot \frac{60{,}5}{100} = 266{,}2 \ л/кг.$$

В составе газообразных продуктов взрыва ядовитыми газами, образующимися в значительных количествах при ведении взрывных работ, являются окись углерода и окислы азота. Последние образуются, правда, в меньшем количестве, чем окись углерода, но зато они являются более ядовитыми. Учитывая токсичность окислов азота, при суммировании ядовитых газов их объем в пересчете на CO обычно увеличивают в 6,5 раза и лишь после этого полученный результат складывают с объемом окиси углерода.

Для оценки ВВ с точки зрения возможности использования в подземных условиях применялись различные методы испытания на способность к образованию ядовитых газов при взрыве.

Еще недавно в качестве официального был принят метод испытания промышленных ВВ на образование ядовитых газов путем подрыва свободно подвешенных зарядов в эвакуированной стальной бомбе с последующим замером общего объема газов и количественным определением окиси углерода и окислов азота в газообразных продуктах.

Впоследствии было доказано, что этот метод испытания не отражает истинной способности ВВ к образованию ядовитых газов при ведении взрывных работ.

Состав продуктов взрыва свободно подвешенных зарядов промышленных ВВ в стальной бомбе может быть с достаточной точностью вычислен теоретически на основании знания лишь элементарного состава исходного вещества, количества бумаги и парафина на оболочке, а также количества горючих и взрывчатых компонентов электродетонатора без учета качества ВВ.

При испытании в бомбе взрывают заряды ВВ, снаряженные в бумажные гильзы, покрытые парафином. Поэтому кислородный баланс заряда с учетом горючих составных частей оболочки и капсюля-детонатора обычно отрицательный. При взрыве таких зарядов в свободно подвешенном состоянии образуется значительное количество окиси углерода; окиси же азота в этих условиях в продуктах взрыва не обнаруживают. Установлено, что состав охлажденных продуктов взрыва свободно подвешенных зарядов промышленных ВВ в бомбе Бихеля приблизительно соответствует равновесному состоянию газов при температуре около 1600°. Очевидно, что при этой температуре скорость химических реакций, определяющих состояние подвижного равновесия, становится в процессе охлаждения бомбы настолько малой, что течение реакций прерывается, наступает «закалка» равновесия, оно становится «ложным» (см. рис. 32). Константа равновесия водяного газа, найденная экспериментально в момент «закалки», равна приблизительно 3. Пользуясь этой величиной и значением элементарного состава заряда, не трудно вычислить теоретически содержание CO в продуктах взрыва, которое должно получиться при взрывании свободно подвешенного заряда в бомбе Бихеля.

При одинаковом кислородном балансе вещества количество окиси углерода в продуктах взрыва свободно подвешенного заряда зависит от соотношения водорода и углерода, а также от количества азота в ВВ. Взрывчатые вещества, входящие в различные группы (аммониты, динамиты, аммоналы), имеют в своем составе приблизительно постоянное содержание азота и близкие соотношения между содержанием водорода и углерода при самом различном количестве парафина и бумаги на оболочке. Поэтому количество окиси углерода в продуктах взрыва свободно подвешенных в стальной бомбе зарядов таких групп ВВ является функцией только кислородного баланса заряда и может быть представлено графически (рис. 36). Практические испытания аммонитов и других промышленных ВВ указанным методом подтверждают правильность теоретически выведенных кривых (см. точки на графике).

При ведении взрывных работ закономерность образования ядовитых газов иная, чем при взрыве свободно подвешенных зарядов в бомбе Бихеля. Замечено, что при взрыве всегда образуется не только окись углерода, но и некоторое количество окислов азота. Ко-

личество ядовитых газов при взрывании в шахтах зависит как от кислородного баланса ВВ, так и от качества технологической обработки аммонитов, а также от обводненности шпуров.

Наиболее правильно отражает естественные закономерности в образовании ядовитых газов испытание взрыванием зарядов ВВ

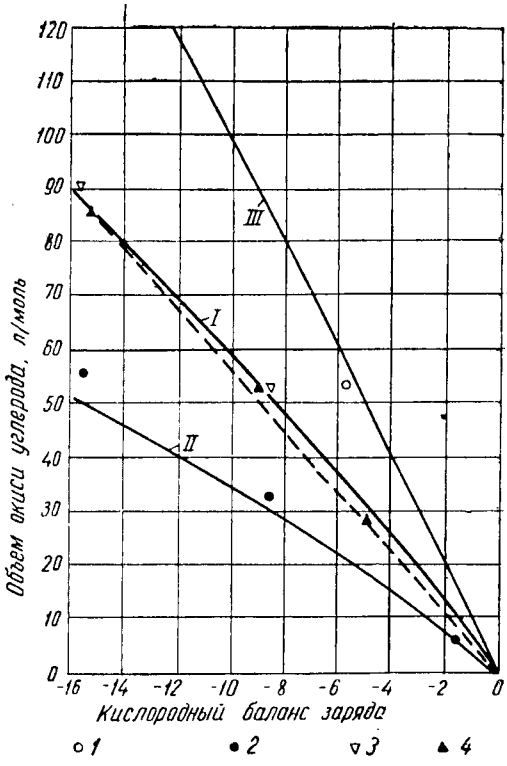


Рис. 36. Расчетные кривые зависимости количества окиси углерода в продуктах взрыва от кислородного баланса заряда при различном отношении H/C в составе заряда: *I* — H/C=6 (аммониты); *II* — H/C=14 (аммонал); *III*— H/C=1.7 (динамиты). Точками отмечены результаты практических испытаний: *1*—93-процентный желатиндинамит; *2* — аммонал с 12% алюминия; *3* — аммонит 76/24; *4* — аммонит № 6

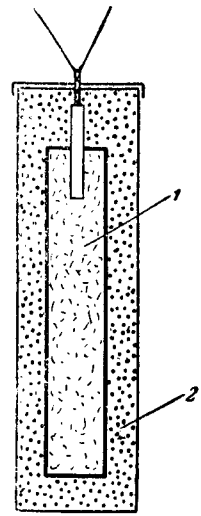


Рис 37. Патрон ВВ в оболочке из песка, снаряженный для испытания в бомбе Долгова или в бомбе Бихеля: *1* — патрон ВВ; *2*—песок

в стальной бомбе в окружении из инертного вещества, например в оболочке из песка (рис. 37). В этом случае, как и в практических условиях применения ВВ, количество ядовитых газов зависит от качества технологической обработки аммонитов, от наличия горючей оболочки на патроне и от кислородного баланса самого ВВ. Так же, как и при взрывании в шахтах, в этих условиях испытания образуется окись азота, количество ее тем больше, чем хуже обработан аммонит. При взрывании зарядов в окружении из инерт-

ных материалов в шахте и в бомбе Бихеля бумажная оболочка патронов в противоположность испытанию свободно подвешенных зарядов не полностью принимает участие в реакции взрыва. Вследствие этого содержание окиси углерода в продуктах взрыва получается меньшим, чем при взрыве свободно подвешенного заряда. Малым участием горючей оболочки в реакции взрыва можно объяснить и замеченный факт меньшего образования окиси углерода при ведении взрывных работ в забоях с мокрыми шпурами (намокание оболочек). Не исключено также, что в этом случае вода, окружающая заряды, принимает участие в реакции взрыва по уравнению:

$$CO + H_2O \rightleftarrows H_2 + CO_2.$$

Чем большее количество воды будет взаимодействовать с продуктами взрыва ВВ, тем большее количество окиси углерода окислится до CO_2.

Понижение температуры взрыва ВВ введением инертных добавок благоприятствует меньшему сгоранию горючей оболочки, что наряду с другими положительно действующими факторами может до некоторой степени благоприятствовать снижению образования ядовитых газов при ведении взрывных работ. Наоборот, повышение температуры взрыва ВВ введением в их состав высококалорийных добавок, вроде алюминия, способствует более полному участию горючей оболочки патронов в реакции взрыва. Участие оболочки патрона в реакции взрыва зависит от кислородного баланса ВВ. Чем более положительный кислородный баланс газообразных продуктов взрыва самого ВВ, тем полнее будет сгорать бумажная оболочка патрона.

Образование окиси углерода и окислов азота связано также с неполнотой взрывчатого превращения ВВ и отдельных его компонентов.

Зона химического превращения в заряде ВВ имеет довольно значительную глубину, особенно если взрывается грубоизмельченный аммонит. Так как компоненты аммонита обладают не одинаковой химической активностью, то возможно, что состав газообразных продуктов в различных частях зоны получается не одинаковым. Во фронте детонации могут преобладать продукты превращения наиболее активного компонента аммонита—тротила. Сгорание некоторой доли частиц селитры может происходить в условиях охлаждения продуктов взрыва частицами измельченной взрывом инертной среды, окружающей заряд, а также вследствие затраты энергии на совершение работы. В результате охлаждения затрудняется взаимодействие продуктов разложения тротила (CO) с продуктами разложения селитры (NO). Это обстоятельство является одной из причин образования ядовитых газов при ведении взрывных работ.

Взаимодействие продуктов разложения отдельных компонентов облегчается при наличии в составе ВВ каталитически активных добавок. Доказано, что введение в состав аммонитов некоторого количества калиевой селитры приводит к уменьшению образования при взрыве не только окислов азота, но и окиси углерода.

Для уменьшения образования ядовитых газов при взрыве стремятся применять ВВ с кислородным балансом, близким к нулевому, и тщательно обработанные в процессе производства. Кроме того, нормируют содержание горючих компонентов оболочки на единицу веса ВВ.

В настоящее время не существует единого официально признанного лабораторного метода испытания ВВ на способность к образованию ядовитых газов при взрыве. Для решения вопроса о допуске новых взрывчатых веществ для применения под землей сравнивают результаты испытаний их в стальной бомбе в окружении песка с результатами испытания в тех же условиях ВВ, применяемых под землей. Кроме того, пользуются результатами сравнительных испытаний, допускаемых и применяемых ВВ непосредственно в условиях практического их применения под землей.

Испытания на образование ядовитых газов в условиях практического применения сводятся к тому, что в глухом забое со специально устроенной на расстоянии около 40 *м* от груди забоя перемычкой, которая закрывается брезентовым занавесом после взрыва, производят взрывание поочередно испытуемым и каким-либо постоянно применяемым в шахте эталонным ВВ. Воздух в забое после каждого из таких взрывов перемешивают и из него отбирают пробы для анализа. Сравнение результатов анализа воздуха после взрывания новым и ВВ, принятым в качестве эталона, позволяет сделать заключение о возможности применения нового ВВ для ведения взрывных работ в подземных условиях.

Анализ воздуха из забоя производится иначе, чем анализ проб газа из стальной бомбы, так как в первом случае концентрация ядовитых газов получается значительно меньшей. Кроме того, окись азота при смешении с воздухом полностью окисляется в двуокись.

Методы определения содержания окиси углерода и двуокиси азота в воздухе описаны в специальных курсах газового анализа.

Большое значение для уменьшения образования ядовитых газов имеет правильное ведение взрывных работ. Так как полностью исключить образование ядовитых газов не удается, то применяют различные методы нейтрализации, например, поглощение ядовитых газов путем орошения забоев перед взрывом водой или щелочными растворами (поглощение окислов азота). Наиболее же действенным средством борьбы с отравлением ядовитыми продуктами взрыва является хорошая вентиляция подземных выработок.

ЗАДАЧИ

1. Вычислить удельный объем газообразных продуктов взрыва аммонита, эмпирическая формула 1 *кг* которого $C_{6,5}H_{46}O_{32}N_{24}$.

2. Вычислите удельный объем газообразных продуктов взрыва гликольдинитрата $[C_2H_4(ONO_2)_2]$.

3. Рассчитать объем газообразных продуктов взрыва (при газообразной воде) по следующим данным: бомба емкостью 20 *л*, заряд ВВ весом 100 *г*, разрежение перед взрывом 740 *мм*, давление (избыточное против атмосферного) 800 *мм*, температура тела бомбы в момент замера давления 20°, привес хлоркальциевых трубок после продувания бомбы сухим воздухом 24 *г*.

4. Рассчитать количество окиси углерода на 1 *кг* ВВ по результатам испытания в бомбе Долгова взрыванием заряда в окружении песка. Объем бомбы 50 *л* (объемом песка пренебречь), разрежение воздуха в бомбе перед взрывом 500 *мм*, атмосферное давление 758 *мм*, избыточное против атмосферного давление в бомбе после взрыва 200 *мм*, температура бомбы в момент замера давления 20°, содержание CO в пробе газа из бомбы по данным анализа 6,0%.

ГЛАВА IX

ТЕПЛОТА И ТЕМПЕРАТУРА ВЗРЫВА

Теплотой взрыва называется то количество тепла, которое выделяется при взрывчатом разложении одного моля или 1 *кг* ВВ.

Теплота реакции взрывчатого превращения является очень важной характеристикой ВВ. Чем больше тепла выделяется при взрывчатом превращении, тем выше работоспособность ВВ. Следовательно, знание теплоты взрыва необходимо для оценки эффективности действия ВВ. Кроме того, знание теплоты взрыва позволяет вычислить температуру продуктов взрывчатого разложения ВВ в момент взрыва.

Теплота взрывчатого превращения может быть вычислена и определена экспериментально.

Расчет теплоты взрыва. При образовании химических соединений из простых веществ (углерод, водород, кислород, азот и др.) происходит поглощение или выделение тепла. То количество теплоты, которое выделяется или поглощается при образовании граммолекулы либо 1 *кг* вещества из простых веществ в стандартных условиях называют теплотой образования вещества и выражают соответственно в *кал/моль* или *ккал/кг*.

В качестве стандартных условий принимают температуру 18° (иногда 25°) и давление в 1 *атм*.

В случае, если при образовании сложного вещества из простых тепло выделяется, то теплота образования этого вещества считается положительной.

При соединении одного грамм-атома углерода с двумя грамм-атомами кислорода выделяется 94,51 *ккал* тепла*. Это значит, что теплота образования углекислого газа (Q_{CO_2}) равна 94,5 *ккал/г-моль*. Если соединение простых веществ происходит с поглощением тепла (например, при окислении азота в пламени электрической дуги), то теплота образования таких соединений считается отрицательной.

В основе вычисления теплоты реакций лежит закон Гесса, согласно которому тепловой эффект реакции не зависит от пути реакции, а только от начального и конечного состояния системы. Это

---

* Теплоты образования приведены из таблиц Медарда. Некоторые авторы считают более точными теплоты, приводимые Россини, по которым, в частности, теплота образования двуокиси углерода равна 94,0518 *ккал/мол*.

означает, что мы можем использовать теплоты образования ВВ и теплоты образования продуктов разложения из простых веществ, приняв совершенно условно, что химическое превращение идет через промежуточную реакцию образования простых веществ. В этом случае теплота взрыва должна быть равна алгебраической сумме теплот обеих реакций.

Теплота образования ВВ выделяется (или поглощается) при реакции:

$$\text{простые вещества} \rightarrow \text{ВВ} + Q_1.$$

Теплота образования продуктов взрыва выделяется при реакции:

$$\text{простые вещества} \rightarrow \text{продукты взрыва} + Q_2.$$

Так как исходным в процессе взрыва является готовое ВВ, то первую реакцию следует представить идущей в обратном направлении, тогда теплота образования ВВ должна быть в правой части уравнения и с обратным знаком:

$$\text{ВВ} \rightarrow \text{простые вещества} - Q_1.$$

Следовательно, теплота превращения ВВ в продукты взрыва, выражаемая алгебраической суммой теплот обеих реакций,

$$Q_{вз} = -Q_1 + Q_2.$$

Следует различать теплоты реакций при постоянном давлении (стандартное условие $P = 1$ *атм*) и при постоянном объеме. Теплота взрыва твердых и жидких ВВ при постоянном объеме больше теплоты взрыва того же ВВ при постоянном давлении, так как в последнем случае часть энергии уходит на совершение работы расширения газообразных продуктов взрыва, занимающих даже после охлаждения бо́льший объем, чем исходное ВВ.

Для взрывчатых веществ наиболее важным является определение теплоты взрыва при постоянном объеме.

Между теплотами реакций при постоянном давлении и постоянном объеме существует зависимость, позволяющая производить пересчет этих теплот. Если принять в качестве стандартной температуру 18°, то, согласно законам термодинамики,

$$Q_V = Q_p + 0{,}58\,(n_2 - n_1),$$

где: Q_V—теплота реакции при постоянном объеме, *ккал/г-моль*;
Q_p—теплота реакции при постоянном давлении, *ккал/г-моль*;
n_2—число молей газообразных продуктов взрыва;
n_1—число молей газообразных молекул в исходном веществе (для твердых и жидких ВВ можно принять $n_1 = 0$).

Термохимические таблицы чаще всего содержат данные по теплотам образования различных веществ при постоянном давлении. Поэтому вначале обычно рассчитывают теплоту взрыва ВВ при постоянном давлении, а затем пересчитывают ее с помощью вышеприведенного уравнения, считая, что реакция протекает при постоянном объеме.

Для расчетов термохимических параметров взрыва составлены специальные таблицы теплот образования и горения веществ при постоянном объеме (табл. 12). Пользуясь данными таких таблиц, можно рассчитывать теплоты взрыва сразу при постоянном объеме, минуя стадию пересчета с Q_p на Q_V.

Таблица 12

Теплоты образования некоторых взрывчатых веществ, их компонентов и продуктов взрывчатого превращения

Наименование вещества	Формула	Молекулярный вес	Теплоты образования, *ккал/г-моль*	
			при постоянном давлении	при постоянном объеме
Вода (жидкая)	H_2O	18	68,37	67,50
Вода (газ)	H_2O	18	57,78	57,49
Углекислота (газ)	CO_2	44	94,51	94,51
Окись углерода (газ)	CO	28	26,88	27,17
Метан (газ)	CH_4	16	18,3	17,7
Окись азота (газ)	NO	30	— 21,6	— 21,6
Аммиак (газ)	NH_3	17	11,0	10,4
Хлористый водород (газ)	HCl	36,5	21,9	21,9
Окись алюминия	Al_2O_3	102	399	398,1
Окись кальция	CaO	56	151,7	150,8
Углекислый калий	K_2CO_3	138	274,46	273,59
Аммиачная селитра	NH_4NO_3	80	87,36	84,75
Азотнокислый калий	KNO_3	101	118,093	116,93
Перхлорат аммония	NH_4ClO_4	117,5	70,2	67,3
Тротил	$C_7H_5O_6N_3$	227	17,5	13,5
Динитронафталин	$C_{10}H_6O_4N_2$	218	— 4,8	— 8,4
Тетрил	$C_7H_5O_8N_5$	287	— 4,70	— 9,91
Гексоген	$C_3H_6O_6N_6$	222	— 15,64	— 20,86
Тэн	$C_5H_8O_{12}N_4$	316	129,37	122,41
Нитроглицерин	$C_3H_5O_9N_3$	227	88,63	83,71
Нитрогликоль	$C_2H_4O_6N_2$	152	59,25	55,75
Диэтиленгликольдинитрат	$C_4H_8O_7N_2$	196	104,2	99,3
Коллодионный хлопок (12,2%)	$C_{22,5}H_{28,8}O_{36,1}N_{8,7}$	1000*	—	649,7
Гремучая ртуть	$C_2O_2N_2Hg$	284,5	— 64,1	— 65,3
Октадекан**	$C_{18}H_{38}$	254,5	144,5	133,5
Стеарат кальция	$C_{36}H_{70}O_4Ca$	607	662,6	641,1
Лигнин	$C_{9,9}H_{11,4}O_{3,5}$	186,2	—	150,43
Целлюлоза	$C_6H_{10}O_5$	162	230,3	226,0

* Теплота образования в *ккал/кг*.

** Формулой и теплотой образования октадекана можно пользоваться при термохимических расчетах для парафина.

В качестве примера рассчитаем теплоту взрыва тэна по реакции

$$C(CH_2ONO_2)_4 = 3CO_2 + 2CO + 4H_2O + 2N_2 + Q.$$

Как следует из закона Гесса, тепловой эффект взрывчатого разложения тэна равен:

$$Q = 3Q_{CO_2} + 2Q_{CO} + 4Q_{H_2O} - Q_1,$$

где: Q —теплота взрыва тэна, *ккал/г-моль*;
Q_1—теплота образования тэна, *ккал/г-моль*;
Q_{CO_2}; Q_{CO}; Q_{H_2O} —теплоты образования продуктов взрыва, *ккал/г-моль*.

Подставляя в уравнение из табл. 12 значения теплот образования продуктов разложения при постоянном объеме и воде газообразной, получаем:

$$Q_V = 3 \cdot 94{,}51 + 2 \cdot 27{,}17 + 4 \cdot 57{,}49 - 122{,}41 = 445{,}42 \text{ ккал/г-моль}.$$

Теплоту взрыва 1 *кг* тэна получают делением теплоты взрыва 1 *г-моля* на молекулярный вес его и умножением на 1000:

$$Q_V = \frac{445{,}42 \cdot 1000}{316} = 1410 \text{ ккал/кг}.$$

В качестве другого примера произведем расчет теплоты взрыва 1 *кг* смеси, состоящей из 48% гексогена и 52% аммиачной селитры.

Найдем количество *г-молей* каждого компонента, входящего в состав смеси, и элементарный состав 1 *кг* смеси:

Наименование компонента	Формула компонента	Весовое содержание компонента в 1 *кг* смеси, *г*	Молекулярный вес компонента	Содержание компонентов в 1 *кг* смеси, *г-моль*	Содержание элементов в смеси, *г-атом*			
					C	H	O	N
Гексоген . . .	$C_3H_6N_6O_6$	480	222	$\frac{488}{222}=2{,}16$	6,48	12,96	12,96	12,96
Аммиачная селитра . . .	NH_4NO_3	520	80	$\frac{520}{80}=6{,}5$	—	26,00	19,50	13,00
					6,48	38,96	32,46	25,96

Несколько округляя содержание элементов в 1 *кг* смеси, реакцию разложения можно написать следующим образом:

$$2{,}16C_3H_6N_6O_6 + 6{,}5NH_4NO_3 = C_{6{,}5}H_{39}O_{32{,}5}N_{26} = 6{,}5CO_2 + 19{,}5H_2O + 12N_2.$$

Теплота образования гексогена отрицательная (—20,8 *ккал/г-моль*), поэтому при вычитании из теплот образования продуктов взрыва числовое значение теплоты образования гексогена будет складываться с теплотой образования продуктов взрыва:

$$Q_V = 6{,}5Q_{CO_2} + 19{,}5Q_{H_2O} - 2{,}16\ Q_{гекс} - 6{,}5\ Q_{ам.сел} = 6{,}5 \cdot 94{,}51 + 19{,}5 \cdot 57{,}49 - $$
$$- 2{,}16(-20{,}86) - 6{,}5 \cdot 84{,}75 = 614{,}3 + 1121{,}0 + 45{,}06 - 550{,}9 = 1229{,}5 \text{ ккал/кг}.$$

Опытное определение теплоты взрыва. Опытное определение теплоты взрывчатого превращения производится при помощи калориметрической бомбы, сходной по конструкции с бомбами для определения состава продуктов взрыва (см. рис. 34).

Калориметрические бомбы бывают различных размеров, соответственно чему величина навесок ВВ при взрыве в таких бомбах может колебаться в широких пределах.

Практически в наиболее распространенных калориметрических бомбах малого размера можно испытывать заряды весом 1—2 *г*, которые воспламеняют раскаленной с помощью электрического тока проволочкой. Точные величины теплот взрыва в таких бомбах можно получить лишь для инициирующих ВВ.

При испытании аммонитов и тротила в калориметрических бомбах малого размера очень трудно получить полноценный взрыв навески, так как раскаленная проволочка вызывает лишь горение состава. Но даже при взрывчатом превращении малых навесок химические потери достигают таких величин, при которых теплоты взрыва получаются искаженными.

Более точные результаты могут быть получены при испытании ВВ в бомбах большого объема. В таких бомбах заряд весом 50—100 *г* взрывают электродетонатором. Заряд ВВ иногда окружают оболочкой из свинца, благодаря которой разложение происходит более полно и в условиях взрыва, близких к практическим условиям применения ВВ.

Для замера тепла, выделяющегося при взрыве, бомбу помещают в бак с точно замеренным количеством воды. В некоторых случаях для определения тепла взрыва успешно применяют непосредственный замер температуры тела бомбы без погружения ее в воду.

Количество тепла, выделившегося в бомбе и поглощенного теплом бомбы или бомбой и водой (в случае погружения бомбы в воду) вычисляют умножением теплоемкости бомбы или системы бомба+вода на разность между конечной и начальной температурами воды или тела бомбы, т. е.

$$Q = (C + C_0)\,(T_к - T_н)\ кал;$$

$$Q_V = \frac{Q}{a}\ 1000\ кал/г,$$

где: C — теплоемкость общего количества воды, окружающей бомбу, *кал/град*;

C_0—теплоемкость аппаратуры, *кал/град*;

$T_к$ и $T_н$—конечная и начальная температура воды и бомбы, град.;

a—навеска ВВ, *г*.

Температуру воды или тела бомбы следует измерять с большой точностью.

При испытании ВВ с нулевым или положительным кислородным балансом необходимо вводить поправку на взаимодействие продуктов взрыва ВВ (избыточного кислорода) с продуктами взрыва электродетонатора и частями заряда, способными к окислению.

В условиях опытов к моменту измерения температуры практически вся вода, образовавшаяся при взрыве, находится в жидком состоянии. Поэтому непосредственные измерения относятся к воде жидкой. Более правильной характеристикой ВВ является теплота взрыва при воде газообразной, так как в момент совершения работы вода в продуктах взрыва находится в парообразном состоянии. Пересчитать результаты опыта на воду газообразную не трудно, если знать количество воды, образовавшейся при взрыве. В этом случае из теплоты, полученной экспериментально, нужно отнять теплоту испарения того количества воды, которое образовалось при взрыве.

Количество образующейся при взрыве воды может быть найдено продуванием бомбы после взрыва сухим воздухом и улавливанием влаги, уносимой воздухом из бомбы.

Экспериментально найденная теплота взрывчатого превращения для некоторых ВВ приведена в табл. 13. Расчетная теплота взрыва для некоторых промышленных ВВ приведена в табл. 22, 23, 24, 25, 29.

Таблица 13

Теплота взрывчатого превращения некоторых ВВ

Наименование ВВ	Плотность, $г/см^3$	Теплота взрыва ВВ, *ккал/кг*, при воде	
		жидкой	парообразной
Тротил	1,5	1090	1010
Гексоген	0,5	1280	—
	1,0	1380	1290
	1,8	1510	—
Тетрил	1,55	1150	1090
Тэн	1,0	1480	1360
Нитроглицерин	1,6	1640	1530
Аммонал 80/20	1,0	1800	1600
Аммонит 80/20	1,0	1210	980
Динафталит	1,0	—	920
Аммонит «скальный» № 1	1,5	1450	—
Гремучая ртуть	3,77	460	410
Дымный порох	1,1	—	665
Пироксилиновый порох пушечный	1,5	—	765
Баллиститный порох с 40% нитроглицерина	1,5	—	1096

Температура взрыва. Температурой взрыва называют ту максимальную температуру, до которой могут нагреваться при взрывчатом превращении продукты разложения ВВ.

Знание температуры взрыва имеет большое значение для решения вопроса о возможности применения ВВ в шахтах со взрывоопасной атмосферой. Кроме того, по температуре взрыва можно вынести суждение о возможной полноте использования энергии при взрыве. Чем ниже температура взрыва при одинаковой теплоте, тем лучше используется энергия при взрыве.

Температура взрыва зависит от состава ВВ и продуктов его разложения. Она выше у тех ВВ, у которых больше теплота и меньше теплоемкость продуктов взрыва.

Температура взрыва аммонитов и других ВВ, в составе которых содержится кислород, повышается при введении в них алюминия и некоторых других металлов, отличающихся большой теплотой сгорания.

Понижение температуры взрыва достигают введением в состав ВВ инертных солей, увеличивающих суммарную теплоемкость продуктов взрыва.

Непосредственное определение температуры взрыва крайне затруднительно. Единственным методом практического определения температуры взрыва, нашедшим применение в некоторых исследованиях, является метод, основанный на изучении спектра светового излучения при взрыве. В спектре пламени взрыва по мере повы-

шения температуры наиболее интенсивное излучение перемещается от красной части спектра к синей. Сравнивая фотографии спектра пламени взрыва со спектром света от источников с известной температурой, можно судить о температуре взрыва ВВ.

Ввиду того, что при практическом использовании указанного метода экспериментального определения температуры взрыва встречается много затруднений и результаты получаются недостаточно точными, температуру взрыва обычно находят путем вычисления.

Предполагается, что взрывчатое разложение происходит при постоянном объеме, и выделяющаяся при взрыве теплота целиком расходуется на нагревание продуктов взрыва. При этом происходит соответственное повышение так называемой внутренней энергии продуктов взрыва, состоящей из энергии поступательного, вращательного и колебательного движения молекул.

Если взрыв происходит в постоянном объеме и работа расширения газов не совершается (например, в закрытой стальной бомбе), то суммарное изменение внутренней энергии соединений, входящих в состав продуктов взрыва, равно энергии взрыва.

Количество энергии, которое поглощается продуктами взрыва при повышении их температуры на один градус, характеризует теплоемкость этих продуктов. Если известна теплоемкость продуктов взрыва, температуру взрыва можно вычислить, пользуясь уравнением:

$$Q_V = C_V t,$$

где: Q_V —теплота взрыва при постоянном объеме, *ккал/кг*;
C_V —средняя теплоемкость продуктов взрыва при температуре от 0 до $t°$, *ккал/кг град.*;
t—температура взрыва, *град.*

Теплоемкость и изменение внутренней энергии продуктов взрыва в любом интервале температур находятся в зависимости от температуры. Зависимости эти сложны, но в настоящее время хорошо изучены. В литературе по термодинамике имеются таблицы теплоемкостей и таблицы изменения внутренней энергии различных газов. В этих таблицах можно найти необходимые для расчета данные.

В табл. 14 приведены изменения внутренней энергии различных газов при нагревании их от 0 до $t°$.

Из сказанного выше следует, что если при взрыве ВВ температура газов взрыва повышается до некоторой величины, показанной в крайнем левом столбце табл. 14, то сумма взятых из таблицы для данной температуры значений внутренней энергии, умноженных на количество *г-молей* этих газов, должна быть равна теплоте, выделяющейся при взрыве.

Для того, чтобы найти температуру взрыва, зная теплоту последнего (при постоянном объеме) и состав его газообразных продуктов, поступают следующим образом. Задаваясь температурой, всегда можно проверить, балансируется ли энергия взрыва с суммарной внутренней энергией продуктов взрыва, соответствующей этой температуре, и путем последовательного подбора найти истин-

ную температуру. Такой метод называют методом последовательных приближений.

Таблица 14

Изменение внутренней энергии газов при нагревании от 0 до $t°$, *ккал/г-моль*

Температура, град.	Изменение внутренней энергии, *ккал/г-моль*, для						
	H_2	O_2	N_2	CO	NO	CO_2	H_2O
0	0	0	0	0	0	0	0
127	0,626	0,646	0,632	0,634	0,656	0,919	0,779
327	1,626	1,736	1,651	1,662	1,720	2,651	2,057
527	2,637	2,913	2,723	2,755	2,856	4,623	3,433
727	3,688	4,259	3,861	3,915	4,058	6,763	4,947
927	4,734	5,450	5,055	5,130	5,310	9,019	6,570
1127	5,841	6,771	6,291	6,386	6,598	11,360	8,290
1327	6,983	8,124	7,557	7,670	7,913	13,762	10,110
1527	8,168	9,500	8,852	8,979	9,248	16,214	12,025
1727	9,390	10,896	10,173	10,310	10,599	18,703	14,020
1927	10,644	12,315	11,502	11,656	11,963	21,219	16,070
2127	11,924	13,758	12,845	13,010	13,338	23,746	18,170
2327	13,235	15,218	14,195	14,370	14,721	26,335	20,315
2527	14,571	16,697	15,559	15,741	16,112	28,922	22,495
2727	15,921	18,192	16,932	17,121	17,509	31,528	24,700
2927	17,283	19,709	18,313	18,505	18,911	34,148	26,926
3227	19,340	22,014	20,388	20,592	21,024	38,103	30 295
3427	20,716	23,568	21,774	21,988	22,434	40,749	32,557
3627	22,100	25,138	23,164	23,888	23,818	43 408	34,835
3827	23.491	26,726	24,558	24,794	25,260	46,075	37,129
4027	24,889	28,330	25,954	26,204	26,686	48,755	39,439

В качестве примера рассчитаем температуру взрыва смеси 48% гексогена и 52% аммиачной селитры.

Согласно произведенному выше расчету реакцию взрыва 1 *кг* смеси, пренебрегая диссоциацией CO_2 и H_2O, можно написать следующим образом:

$$2{,}16(CH_2NNO_2)_3 + 6{,}3NH_4NO_3 = 6{,}5CO_2 + 19{,}5H_2O + 12N_2 + 1232 \text{ ккал}.$$

Предположим, что температура взрыва равна 3427°. Пользуясь табл. 14, вычислим внутреннюю энергию продуктов взрыва при этой температуре:

$$6{,}5 \cdot 40{,}749 + 19{,}5 \cdot 32{,}557 + 12 \cdot 21{,}774 = 1161 \text{ ккал}.$$

Внутренняя энергия оказалась меньше энергии взрыва на 71 *ккал*.

Примем температуру $t = 3627°$. Тогда внутренняя энергия при этой температуре будет:

$$6{,}5 \cdot 43{,}408 + 19{,}5 \cdot 34{,}835 + 12 \cdot 23{,}164 = 1239 \text{ ккал},$$

что очень мало отличается от энергии взрыва (7 *ккал*).

Так как при изменении температуры на 200° величина внутренней энергии изменилась на 1239—1161 = 78 *ккал*, то изменение на 7 *ккал* должно привести к изменению температуры приблизительно на $200 \frac{7}{78} \cong 18°$. Поэтому, округляя, температуру взрыва можно принять равной 3600°.

При приближенных расчетах зависимость теплоемкости от температуры часто выражают уравнением:

$$C_V = a + bt,$$

где a и b — коэффициенты, выражающие функциональную зависимость теплоемкости от температуры.

Тогда

$$Q_V = C_V t = (a + bt)\, t.$$

Следовательно, связь между теплотой и температурой взрыва в этом случае выражается квадратным уравнением:

$$bt^2 + at - Q_V = 0.$$

Из этого уравнения находим температуру взрыва:

$$t = \frac{-a + \sqrt{a^2 + 4bQ_V}}{2b}.$$

Согласно Касту:

для двухатомных газов $C_V = 4{,}8 + 4{,}5 \cdot 10^{-4}\ t$ *кал/моль град.*;

для паров воды $C_V = 4{,}0 + 21{,}5 \cdot 10^{-4}\ t$ *кал/моль град.*;

для углекислого газа $C_V = 9{,}0 + 5{,}8 \cdot 10^{-4}\ t$ *кал/моль град.*;

для четырехатомных газов $C_V = 10{,}0 + 4{,}5 \cdot 10^{-4}\ t$ *кал/моль град.*;

для пятиатомных газов $C_V = 12{,}0 + 4{,}5 \cdot 10^{-4}\ t$ *кал/моль град.*;

для твердых продуктов взрыва $C_V = 6{,}4 \cdot n$,

где n — число атомов, входящих в молекулу твердого вещества.

Пример. Определить приближенно температуру взрыва тротила, если разложение его идет по уравнению:

$$C_6H_2(NO_2)_3CH_3 = 2CO + 1{,}2CO_2 = 3{,}8C + 0{,}6H_2 + 1{,}6H_2O + 1{,}4N_2 + 0{,}2NH_3.$$

Пользуясь данными табл. 12, найдем теплоты образования продуктов взрыва:

$2CO$	$2 \cdot 27{,}17 = 54{,}34$ *ккал*
$1{,}2CO_2$	$1{,}2 \cdot 94{,}51 = 113{,}5$ »
$1{,}6H_2O$	$1{,}6 \cdot 57{,}49 = 92{,}0$ »
$0{,}2NH_3$	$0{,}2 \cdot 10{,}4 = 2{,}08$ »

Сумма теплот образования всех продуктов взрыва $+261{,}9$ *ккал;* теплота образования тротила $+13{,}5$ *ккал/г-моль.*

Теплота взрывчатого превращения тротила:

$$Q = 261{,}9 - 13{,}5 = 248{,}4\ \textit{ккал/г-моль}.$$

Согласно реакции, в продуктах взрыва содержится 4 моля двухатомных газов $(2CO + 0{,}6H_2 + 1{,}4N_2)$. Суммарная теплоемкость этих газов равна $4(4{,}8 + 0{,}00045\ t) = 19{,}2 + 0{,}00180\ t$.

Теплоемкость остальных продуктов взрыва будет следующей:

$1{,}2CO_2$	$1{,}2(9{,}0 + 0{,}00058\ t) = 10{,}8 + 0{,}00070\ t$
$3{,}8C$	$3{,}8 \cdot 6{,}4 = 24{,}3$
$1{,}6H_2O$	$1{,}6(4{,}0 + 0{,}00215\ t) = 6{,}4 + 0{,}00344\ t$
$0{,}2NH_3$	$0{,}2(10{,}0 + 0{,}00045\ t) = 2{,}0 + 0{,}00009\ t$

Теплоемкость всех продуктов взрыва равна $62{,}7 + 0{,}00603\ t$, следовательно, $a = 62{,}7$; $b = 0{,}00603$:

$$t = \frac{-a + \sqrt{a^2 + 4bQ_V}}{2b} = \frac{62{,}7 + \sqrt{62{,}7^2 + 4 \cdot 0{,}00603 \cdot 247{,}9 \cdot 1000^*}}{2 \cdot 0{,}00603},$$

приближенно

$$t = 3050^\circ\ \text{C},$$

или

$$T \cong 3320^\circ\ \text{K}.$$

---

* Множитель 1000 вводится потому, что Q_V выражается в больших калориях, а значения теплоемкостей приведены в малых калориях.

ЗАДАЧИ

1. Вычислить теплоту взрыва аммонита № 6, состав и уравнение взрывчатого разложения которого приведены в главе 7.

2. Вычислить теплоту взрывчатого превращения ВВ (при воде жидкой), если при испытании в стальном блоке (в бомбе без погружения в воду) весом 250 *кг* с теплоемкостью стали 0,12 *кал/г-град* были получены следующие данные: начальная температура блока 20°, показание термометров в трех различно расположенных точках бомбы после взрыва 21,65; 21,67 и 21,70°, навеска ВВ—50 *г*

ГЛАВА X

РАБОТА ВЗРЫВА

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГИИ ВЗРЫВА

Общей энергией химического превращения ВВ (потенциальной энергией) обычно считают теплоту, которая выделяется при взрыве ВВ в постоянном объеме без совершения внешней работы.

Наличие газов в продуктах взрыва делает возможным в процессе их расширения превращение тепла в механическую работу.

Превращение тепла при взрыве в механическую работу происходит со значительными потерями. Кроме того, само химическое превращение вещества в условиях практического применения почти никогда не бывает полным.

Как уже было сказано выше (см. главу 5), при детонации происходит частичный разброс вещества (так называемый боковой разброс ВВ), обусловливающий химические потери, т. е. потери, связанные с неполнотой химического превращения ВВ. Потери такого рода бывают относительно тем бóльшими, чем меньше диаметр заряда и чем он ближе по величине к критическому значению.

В некоторых случаях образование при взрыве промежуточных продуктов химического превращения идет с поглощением энергии, и разброс таких продуктов ведет к еще большим химическим потерям, чем от разброса частичек исходного ВВ. К химическим потерям можно условно отнести также и потери, связанные с намоканием слоя ВВ в сырых шпурах, в результате которого увеличивается разброс неразложившихся при взрыве частиц ВВ.

По своей величине в некоторых условиях химические потери могут быть весьма значительными. При взрыве небольших открытых зарядов потери только вследствие бокового разброса могут достигать десятков процентов от общей энергии ВВ. В окружении прочной массивной среды, препятствующей разлету частиц ВВ, при взрыве зарядов достаточно большого диаметра химические потери невелики. Зазоры между боковой поверхностью заряда и стенками шпура ухудшают прохождение детонации по заряду и в некоторых

случаях приводят к росту химических потерь вследствие частичного или полного прекращения детонации ВВ в этих условиях.

Химические потери особенно велики при взрыве грубоизмельченных, переуплотненных и слежавшихся аммонитов. Уменьшения химических потерь у аммонитов можно достигнуть улучшением качества их технологической обработки, применением зарядов повышенного диаметра и оптимальной плотности, устранением зазоров между стенками шпура и боковой поверхностью зарядов и снижением слеживаемости.

Так как взрывные работы часто ведутся в обводненных выработках, то придание водоустойчивости аммонитам обеспечивает снижение потерь, связанных с частичным или полным намоканием ВВ.

Вся энергия ВВ за вычетом химических потерь выделяется в момент взрыва в виде тепла и составляет полную фактическую тепловую энергию ВВ. Но и эта энергия не может быть полностью превращена в механическую работу. Неполнота превращения тепловой энергии в механическую работу обусловлена наличием тепловых или термодинамических потерь.

Как было показано еще в 1880 г. русским ученым И. М. Чельцовым, работу взрыва можно рассматривать как работу адиабатического расширения продуктов взрыва, т. е. такого расширения, при котором не происходит теплообмена между продуктами взрыва и взрываемой средой. В последнее время представление о работе взрыва, как о работе газообразных продуктов взрыва в процессе их адиабатического расширения, развито советским ученым А. Ф. Беляевым.

Полное превращение тепла в механическую работу в процессе адиабатического расширения возможно лишь в том случае, если расширение происходит до бесконечно большого объема. Практически расширение продуктов взрыва при совершении ими работы ограничивается некоторыми пределами. В качестве условного предела можно принять величину атмосферного давления, хотя при взрыве в воздухе конечное давление на некоторый момент может стать несколько меньше атмосферного.

Работу расширения продуктов взрыва до атмосферного давления называют полной идеальной работой взрыва.

Математически эта работа может быть выражена уравнением:

$$A = E\left[1 - \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\kappa-1}\right],$$

где: E — потенциальная энергия или, применительно к реальным условиям, полная фактическая тепловая энергия ВВ;

V_1 и V_2 — начальный и конечный объем газов;

$\kappa = \frac{C_p}{C_V}$ — отношение средних теплоемкостей газообразных продуктов взрыва при постоянном давлении и постоянном объеме (показатель адиабаты).

Это уравнение, выражающее зависимость работы расширения от величины потенциальной энергии (равной теплоте взрыва, умножен-

ной на механический эквивалент тепла $E=427\ Q_{KV}$), степени расширения газов $\frac{V_2}{V_1}$ и величины показателя адиабаты κ, выведено по законам, действительным для идеальных газов.

При высоких давлениях, возникающих при взрыве очень плотных ВВ, уравнения состояния идеальных газов не применимы. Однако работа газов при сверхвысоких давлениях совершается лишь в самом начале расширения и относительно невелика по сравнению с общей работой расширяющихся газов. Поэтому следует считать, что уравнение идеальной работы взрыва отражает закономерности, действующие в условиях практического применения ВВ.

Анализируя уравнение, прежде всего можно заметить, что при идеальном адиабатическом процессе расширения до бесконечно большого обьема ($V_2=\infty$) работа равна потенциальной энергии, так как в этом случае $\left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\kappa-1}=0$. Следовательно, чем больше теплота взрывчатого превращения, тем больше идеальная работоспособность ВВ. Если конечное расширение продуктов взрыва (V_2) незначительно, незначительна и работа взрыва. При $V_2=V_1$ $A=0$.

Уменьшение степени расширения газообразных продуктов взрывчатого превращения за время совершения ими работы разрушения горного массива может быть отчасти следствием неправильного расчета количества и глубины шпуров, а также отсутствия хорошей забойки.

Из уравнения идеальной работы взрыва также видно, что при одинаковой энергии ВВ и одинаковой степени расширения продуктов взрыва (при одном и том же отношении $\frac{V_1}{V_2}$) переход потенциальной энергии в работу должен быть тем полнее, чем больше отношение средней теплоемкости продуктов взрыва при постоянном давлении к средней теплоемкости их при постоянном объеме. Из термодинамики известно, что теплоемкость газов при постоянном давлении больше теплоемкости газов при постоянном объеме на величину газовой постоянной R из уравнения идеальных газов, т. е. $C_p=C_V+R$. Поэтому показатель степени $\kappa-1$ можно преобразовать так:

$$\kappa-1=\frac{C_p}{C_V}-1=\frac{C_V+R}{C_V}-1=\frac{C_V+R-C_V}{C_V}=\frac{R}{C_V}.$$

Из последнего отношения также видно, что показатель степени $(\kappa-1)$ тем больше, чем меньше теплоемкость газа. Так как $\frac{V_1}{V_2}$ — правильная дробь, то чем больше показатель степени $(\kappa-1)$, тем меньше будет величина, вычитаемая из единицы в уравнении идеальной работы взрыва, и, следовательно, больше работа взрыва A.

Теплоемкость растет с увеличением числа атомов в молекуле; следовательно, для полноты перехода потенциальной энергии в работу выгодно иметь в составе продуктов взрыва большое количество двухатомных газов. Чем больше образуется при взрыве двухатомных газов, тем больше общий объем газообразных продуктов взры-

ва. Поэтому ВВ, дающие при равной теплоте взрыва бо́льший объем газов, оказываются обычно более работоспособными. С этой же точки зрения невыгодно иметь в продуктах взрыва твердые вещества, так как они, не увеличивая объема, увеличивают суммарную теплоемкость.

Таким образом, тепловыми или термодинамическими потерями можно назвать потери, обусловленные ограниченной степенью расширения продуктов взрыва в процессе совершения ими работы, повышенной теплоемкостью многоатомных газов и наличием в составе продуктов взрыва твердых частиц.

К такого рода идеальным тепловым потерям следует добавить потери, связанные с отклонением процесса расширения от адиабатического. Часть тепла при взрыве идет на нагревание окружающей заряд среды путем теплообмена и внутреннего трения при пластических деформациях среды. Особенно интенсивный теплообмен с

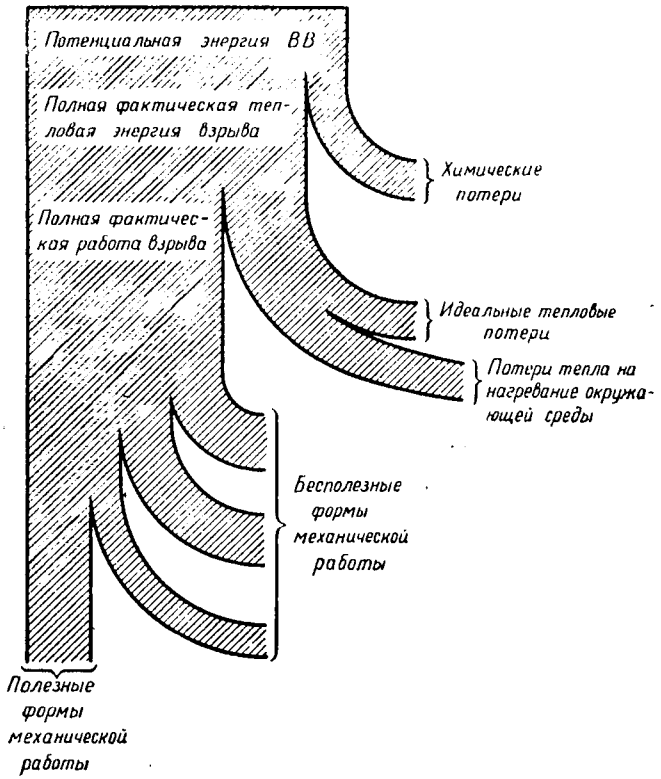


Рис. 38. Схема распределения энергии ВВ при взрыве

окружающей средой бывает в тех случаях, когда происходит очень тонкое дробление среды, прилегающей к очагу взрыва. Получающаяся при дроблении пыль, смешиваясь с продуктами взрыва, может отнять у них значительное количество тепла еще в процессе со-

вершения работы расширения. Суммарные тепловые потери при взрыве могут составить более половины от всей энергии ВВ.

Вся энергия ВВ за вычетом химических и тепловых потерь составляет полную фактическую работу взрыва.

При практическом применении ВВ из всех форм механической работы, совершающейся при взрыве в каждых конкретных условиях, полезными являются лишь немногие. Например, при дроблении массива горной породы в шахтах или на карьерах значительная доля энергии уходит на ненужные в данном случае разброс породы, на образование воздушной ударной волны и т. п.

Коэффициент полезного действия взрыва, выражаемый отношением доли энергии, приходящейся на полезные формы работы, к общей энергии ВВ, всегда мал и в некоторых случаях не превышает 5—6%.

Распределение энергии ВВ при взрыве схематически представлено на рис. 38.

ФОРМЫ РАБОТЫ ВЗРЫВА

Лучшее использование полной фактической работы взрыва в виде полезных форм механической работы достигается в результате экспериментального подбора наиболее рациональных методов ведения взрывных работ и правильного выбора ВВ.

На характер работы ВВ в условиях практического их применения весьма существенное влияние оказывают такие свойства ВВ, как теплота взрыва, плотность и скорость детонации.

Величина механической работы, производимой на больших расстояниях от очага взрыва, зависит главным образом от потенциальной энергии ВВ, выражаемой теплотой взрыва. В непосредственной же близости к заряду действие взрыва на окружающую среду находится в сильной зависимости от скорости детонации.

Многочисленные формы механической работы удобно объединить в две основные группы — фугасные и бризантные.

К фугасным формам работы ВВ относят образования полости в грунте или в другой плотной среде, выброс породы из воронки, а также разрушения на значительных расстояниях от места взрыва, производимые воздушной ударной волной. Фугасные формы работы обусловливаются действием ударной волны и непосредственно газов взрыва в течение времени, достаточном для использования большей части полной работы взрыва.

Работу образования полости в грунте или выброса грунта из воронки можно считать пропорциональной работе адиабатического расширения, согласно вышеприведенному уравнению идеальной работы взрыва. Таким образом, фугасное действие определяется работоспособностью ВВ, зависящей от теплоты взрыва, состава продуктов взрыва и степени их расширения, и практически не зависит от скорости детонации ВВ.

При взрыве ВВ в воздухе полная работа взрыва почти целиком

переходит в воздушную ударную волну, действие которой зависит от величины давления в ней и времени воздействия на преграду.

Как известно, действие силы в течение определенного времени характеризуется произведением силы на время, называемым импульсом силы. На графике импульса (рис. 39), где по оси абсцисс отложено время t, а по оси ординат—величина силы F, импульс выражается площадью прямоугольника, высота которого равна силе, а основание — времени действия силы (если сила постоянная на протяжении всего времени действия).

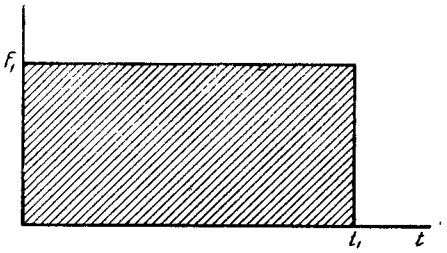


Рис. 39. График импульса силы при постоянной ее величине

Так как действие ударной волны происходит во времени, то это действие характеризуется импульсом ударной волны. Давление ударной волны после встречи с преградой не остается постоянным, ослабевая с течением времени. Поэтому полный импульс ударной волны характеризуется не простым произведением давления на время, а суммой произведений крайне малых отрезков времени на те величины давлений, которые действуют на протяжении каждого из них. Сумма этих произведений может быть представлена в виде площади фигуры, очерченой кривой зависимости давления от времени и осями координат (рис. 40).

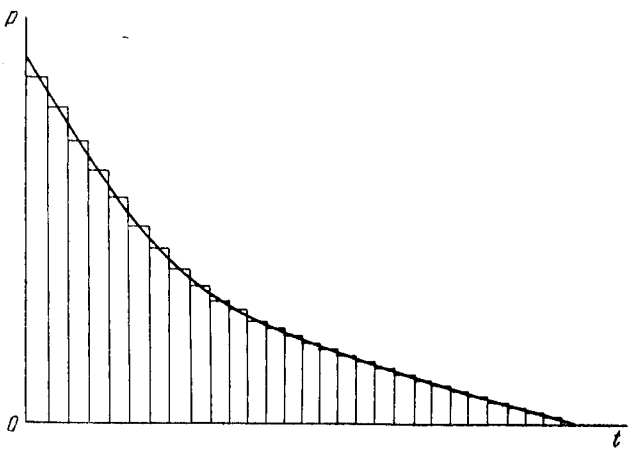


Рис. 40. График полного импульса ударной волны

При взрыве в грунте удаленные от заряда ВВ части грунта получают движение под воздействием значительной доли полного импульса взрыва. В непосредственной близости к заряду ВВ происходит сильное дробление окружающей заряд горной породы. Иногда дро-

бящее действие ВВ является главной из полезных форм работы, например, при дроблении породы взрывом накладных зарядов.

К бризантным формам работы относят такие, в которых проявляется дробящее или пробивающее действие взрыва.

В отличие от фугасного действия ВВ для дробления используется не полный импульс взрыва, а лишь небольшая головная часть его. Работа дробления сама по себе не велика, но она требует создания высоких напряжений в разрушаемом материале. Это объясняется тем, что для дробления требуется сдвиг частиц породы друг относительно друга на ничтожно малые расстояния, достаточные для преодоления сил сцепления. Поэтому и работа, равная произведению силы на путь, несмотря на большую величину силы, может быть очень малой.

Бризантное действие ВВ тем сильнее, чем больше перепад давления на фронте детонационной волны. Если два ВВ характеризуются одинаковой энергией (теплотой взрыва), но различаются по бризантному действию, то при равных полных импульсах головные части этих импульсов должны быть различными, как это показано схематически на рис. 41.

В пределе отношение головных частей импульса будет стремиться к отношению максимальных детонационных давлений.

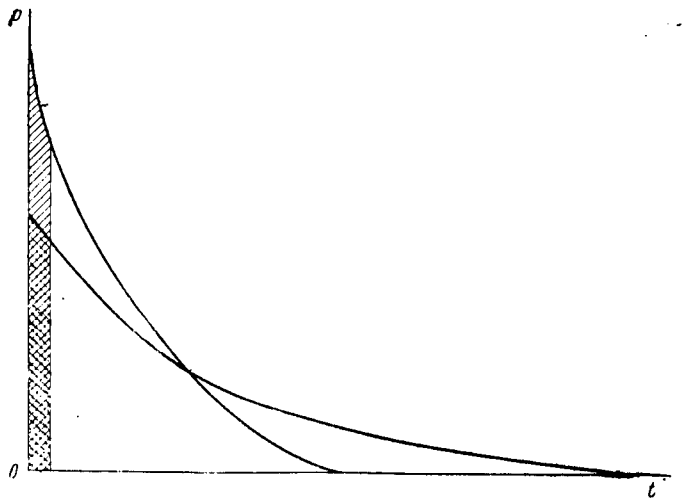


Рис. 41. Головные части импульсов (заштрихованная часть), характеризующие бризантное действие ВВ (различная бризантность при равной работоспособности)

Согласно гидродинамической теории детонации, максимальное давление во фронте детонации выражается отношением:

$$P = \frac{\rho_0 D^2}{4},$$

где: ρ_0 — плотность ВВ;
D — скорость детонации.

Таким образом, наиболее бризантные формы работы пропорциональны плотности ВВ и квадрату скорости детонации.

Некоторые авторы характеризуют бризантность ВВ отношением теплоты взрыва единицы объема ВВ к времени детонации единицы длины заряда, т. е. мощностью ВВ.

Я. Б. Зельдович и К. П. Станюкович предложили характеризовать бризантность ВВ величиной импульса, действующего на преграду в месте соприкосновения ее с ВВ. В этом случае бризантное действие пропорционально плотности заряда и первой степени скорости детонации.

В конкретных условиях работы фугасное и бризантное действие ВВ сочетаются в самых различных соотношениях, поэтому иногда бывает затруднительно сделать выбор взрывчатого вещества на основании данных о теплоте взрыва и скорости детонации без практической проверки эффективности ВВ.

ПРАКТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДЕЙСТВИЯ ВВ

Самым надежным методом определения эффективности действия взрывчатых веществ является практическое испытание их в конкретных условиях применения.

Под конкретными условиями следует понимать определенный вид полезной работы (рыхление, выброс, дробление породы и т. д.), а также и свойства породы (крепость, вязкость, трещиноватость и т. п.).

Однако подобные испытания очень сложны и дороги. Поэтому широкое распространение получили лабораторные методы испытания, позволяющие сравнивать эффект взрыва различных ВВ в условиях, когда преобладают фугасные или бризантные формы работы.

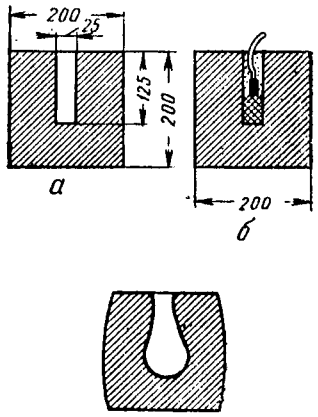


Рис. 42. Свинцовая бомба для определения работоспособности ВВ

Испытание в свинцовой бомбе. Для определения фугасности или практической работоспособности ВВ применяют массивную цилиндрическую свинцовую бомбу (рис. 42,*а*) с цилиндрическим гнездом.

Заряд ВВ весом 10 *г* и плотностью около 1 *г/см*^{3} помещают в цилиндрическую оболочку из тонкой бумаги. В патрон помещают капсюль-детонатор или электродетонатор. Подготовленный таким образом патрон вводят в гнездо бомбы (рис. 42,*б*). Свободное пространство канала в бомбе над зарядом засыпают кварцевым песком, просеянным через сито (144 отверстия на 1 *см*^{2}).

После взрыва замеряют объем образовавшейся грушевидной полости (рис. 42,*в*), заливая в нее измеренное количество воды. Из

полученного объема полости вычитают первоначальный объем канала и объем полости, который получается при взрыве одного капсюля-детонатора без заряда ВВ. Увеличение объема канала служит характеристикой работоспособности ВВ или его фугасности.

Для получения сравнимых результатов необходимо соблюдать строго стандартные условия испытания ВВ и изготовления самих бомб. Слишком мягкий или слишком жесткий свинец может обусловить получение неправильных результатов. Поэтому каждую партию отлитых свинцовых бомб следует испытывать по эталонному ВВ, в качестве которого применяют перекристаллизованный тротил.

Температура, при которой производят испытания, также оказывает влияние на результаты. Если температура выше или ниже +15°, то в результаты вносят соответствующую поправку.

Ниже приводятся данные испытаний некоторых ВВ на работоспособность в свинцовой бомбе.

Взрывчатое вещество	Расширение в свинцовой бомбе, $см^3$
Тротил	285
Тетрил	340
Тэн	500
Гексоген	475
62-процентный труднозамерзающий динамит	360
Аммонит № 6	360
Аммонит № 7	350
Динафталит	320
Аммонит № 9	300
Аммонит скальный № 1	450

Определение работоспособности ВВ при помощи баллистического маятника. Другим менее распространенным методом характеристики работоспособности ВВ является испытание его при помощи баллистического маятника. Этот прибор (рис. 43) представляет собой подвешенный на металлических тягах маятниковый груз, который отклоняется при взрыве в мортире заряда ВВ. О работе ВВ судят по величине заряда, отклоняющего маятник при взрыве на стандартное расстояние. Маятник имеет большие размеры. Груз сделан из 11-дюймовой мортиры и весит 10 *т*. Вторая мортира, в которую помещают заряд ВВ, подвешена на тележке, передвигающейся по рельсовой колее, установленной на некоторой высоте от пола помещения. Заряд ВВ помещают в канал второй мортиры и забивают глиной (500 *г*). Вес заряда около 200 *г*. Мортиры перед взрывом соприкасаются открытыми концами.

При взрыве мортира с тележкой откатываются назад, а большая мортира-маятник начинает качаться, сдвигая ползунок на шкале под мортирой.

Существуют маятники-мортиры несколько иных конструкций и размеров.

Баллистическая мортира, изображенная на рис. 44, состоит из свободно подвешенной мортиры-маятника *1*, внутри которого помещается заряд (около 10 *г*) испытуемого ВВ. Взрывная камера *2* закрывается снарядом *3*, который при взрывании выбрасывается, а маятник силой отдачи отклоняется назад. По углу отклонения судят

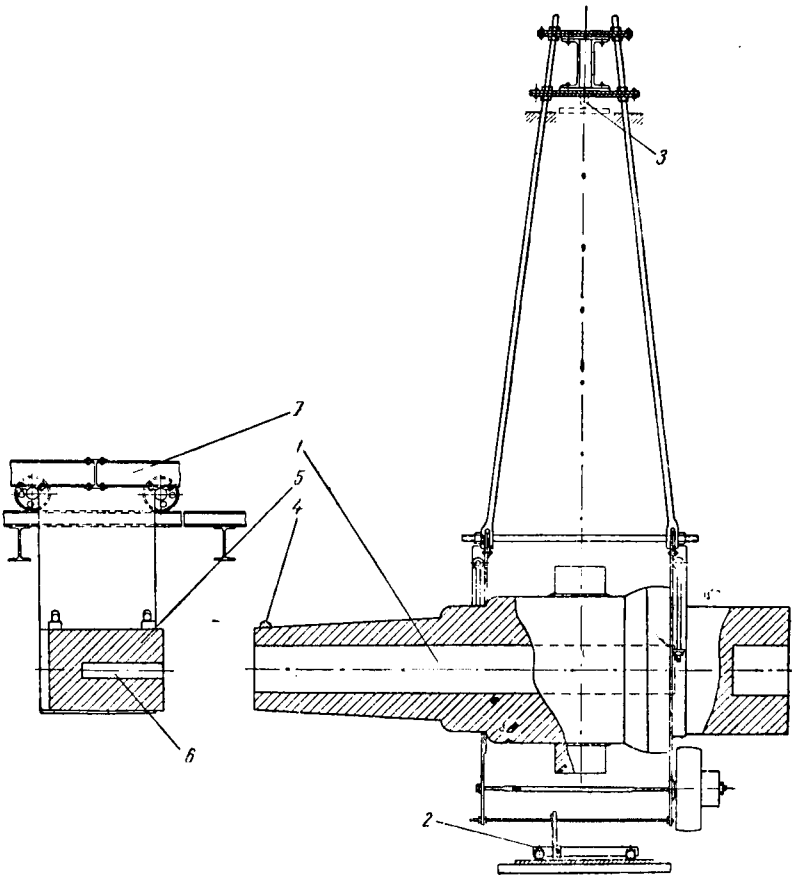


Рис. 43. Схема баллистического маятника: *1* — канал маятника; *2* — указатель отклонений; *3* — стальная опорная призма; *4* — призма; *5* — мортира; *6* — канал мортиры; *7* — тележка мортиры

о работоспособности взрывчатого вещества. Этот метод дает возможность выразить работоспособность в единицах работы на 1 *кг* ВВ (*кгм/кг*).

Работоспособность ВВ в баллистических маятниках определяют при меньших степенях расширения продуктов взрыва, чем в свинцовой бомбе.

Определение бризантности по пробе на обжатие свинцовых столбиков. В описанных выше методах испытания заряд ВВ взрывается,

будучи окружен со всех сторон твердой средой, сдерживающей разлет продуктов взрыва, благодаря чему импульс взрыва используется для совершения работы с достаточной полнотой. При определении бризантности на свинцовых столбиках заряд ВВ лишь с одного торца соприкасается с твердой средой, способной к деформации. Поэтому в данном случае давление газов взрыва быстро рассеивается в воздухе, встречая сопротивление лишь со стороны столбика. Для деформации столбика используется не полный импульс взрыва, а только его головная часть.

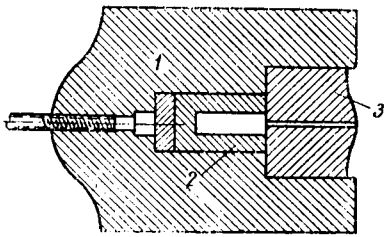


Рис. 44. Баллистическая мортира

Практически испытание осуществляется следующим образом. Навеску ВВ в 50 *г* помещают в цилиндрический бумажный патрон диаметром 40 *мм* и подпрессовывают до плотности 1 *г/см*^{3} с одновременным образованием гнезда для детонатора. В патрон вкладывают картонный кружок с отверстием для детонатора. Затем патрон устанавливают на круглую стальную пластинку толщиной 10 *мм* и диаметром 41 *мм*, расположенную на свинцовом столбике диаметром 40 *мм* и высотой 60 *мм*. Столбик с зарядом ВВ укрепляют на стальной плите, толщиной не менее 20 *мм* (рис. 45). В гнездо заряда помещают капсюль-детонатор или детонатор, с помощью которого взрывают заряд.

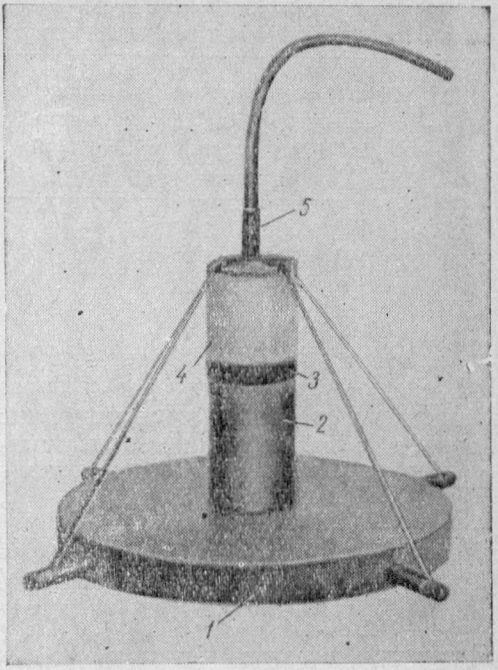
При взрыве происходит обжатие свинцового столбика. Замер высоты столбика до и после взрыва дает возможность определить величину обжатия в миллиметрах, которым и характеризуется бризантность ВВ. Пластическая деформация свинцового столбика, конечно, не является чисто бризантной формой работы, но она все же характеризует величину головной части импульса.

Бризантность некоторых ВВ, определенная таким методом, показана ниже.

Наименование ВВ	Обжатие, *мм*, при плотности 1,0 *г/см*^{3}
Тротил	16
Тетрил	18—19
Аммонит № 6	14
Аммонит № 7	13
Динафталит	15
Аммонит № 9	10
Аммонит скальный № 1	18
Аммонит скальный № 1	23 (при плотности 1,45 *г/см*^{3})
62-процентный труднозамерзающий динамит	16 (при плотности 1,45 *г/см*^{3})

Если при испытании ВВ в свинцовой бомбе или на баллистическом маятнике показатели зависят почти исключительно от состава ВВ и практически мало зависят от качества его технологической обработки, то на результаты испытания по пробе на обжатие свинцовых столбиков оказывает сильное влияние степень измельчения порошкообразных ВВ. Усиленным измельчением можно значительно повысить бризантность аммонита (см. таблицу на стр. 104).

Бризантность, как было сказано выше, зависит от плотности ВВ. Соответственно этому обжатие свинцовых цилиндриков в некоторых пределах плотностей находится в пропорциональной зависимости от плотности ВВ. Уплотнение влажного аммонита может привести к снижению бризантности (рис. 46) или к полной потере детонационной способности.



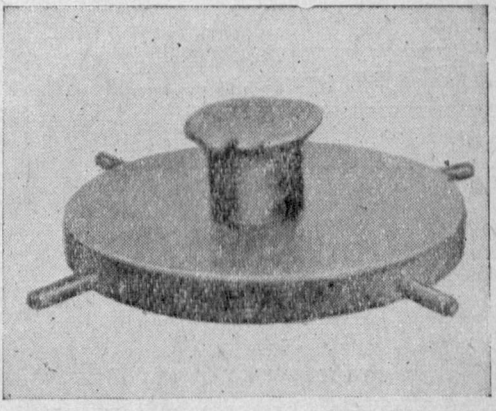


Рис. 45. Определение бризантности обжатием свинцовых столбиков: *а*—общий вид; *б*—свинцовый столбик после испытания: *1*—стальная плита; *2*—свинцовый столбик; *3*—стальная пластинка; *4*—патрон с испытуемым ВВ; *5*—детонатор

В некоторых случаях при испытании плохо детонирующих веществ для улучшения эффекта взрыва заряд помещают в стальные кольца (отрезки стальной трубы по размеру заряда). Однако результаты подобных испытаний в очень малой степени характеризуют бризантное действие ВВ, так как стальное кольцо создает сопротивление боковому разлету продуктов взрыва, увеличивая время их действия на свинцовый столбик. В этом случае на столбик действует не только головная часть

импульса, но и значительная доля полного импульса, т. е. проявляются фугасные формы работы взрыва.

Количество аммонита, проходящего при ситовом анализе через сито №60 (60 отверстий на линейный сантиметр), %	Обжатие свинцового цилиндрика, *мм* (бризантность)
34	15
44	16
54	17
64	18
74	19

Определение бризантности с помощью баллистического маятника. В последнее время для оценки бризантного действия взрывчатых веществ иногда пользуются испытаниями при помощи специальных баллистических маятников. Принципиальное отличие этих маятни-

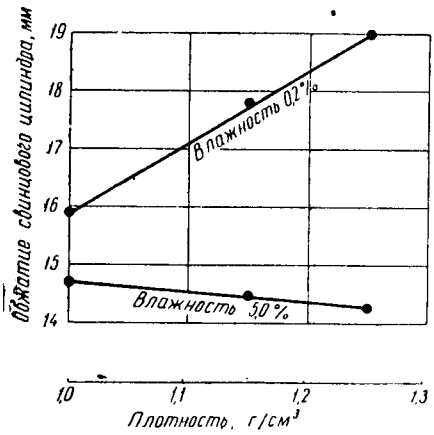


Рис. 46. Бризантность аммонита № 6 при разной плотности

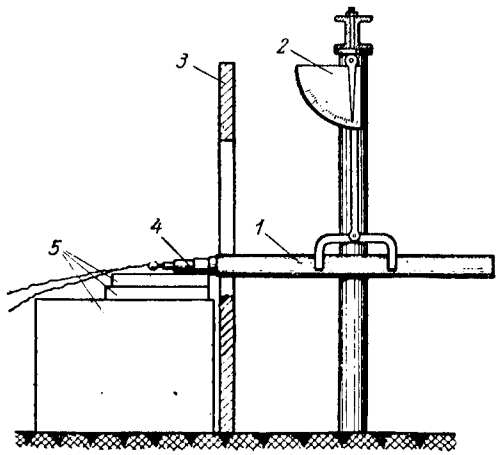


Рис. 47. Баллистический маятник: *1*—основной груз; *2*—шкала для определения углов отклонения; *3* — броневой щит; *4*—заряд ВВ; *5*—плиты-подставки

ков от применяемых для определения работоспособности состоит в том, что заряд ВВ помещают не в мортиру, а на поверхность качающегося груза. Одна из конструкций баллистического маятника для определения бризантности показана на рис. 47. Бризантность ВВ при испытании на баллистическом маятнике характеризуется величиной импульса силы, действующей на конец маятника, к которому прикрепляют заряд ВВ. Величину импульса вычисляют по углу отклонения маятника.

О бризантном действии ВВ можно судить не только по обжатию свинцовых столбиков или измерению импульсов, но и по непосредственным определениям скорости детонации ВВ в зарядах опреде-

ленного диаметра. Зависимость между бризантностью, определяемой по стандартному испытанию на свинцовых столбиках, и скоростью детонации в зарядах различных диаметров для аммонита № 6

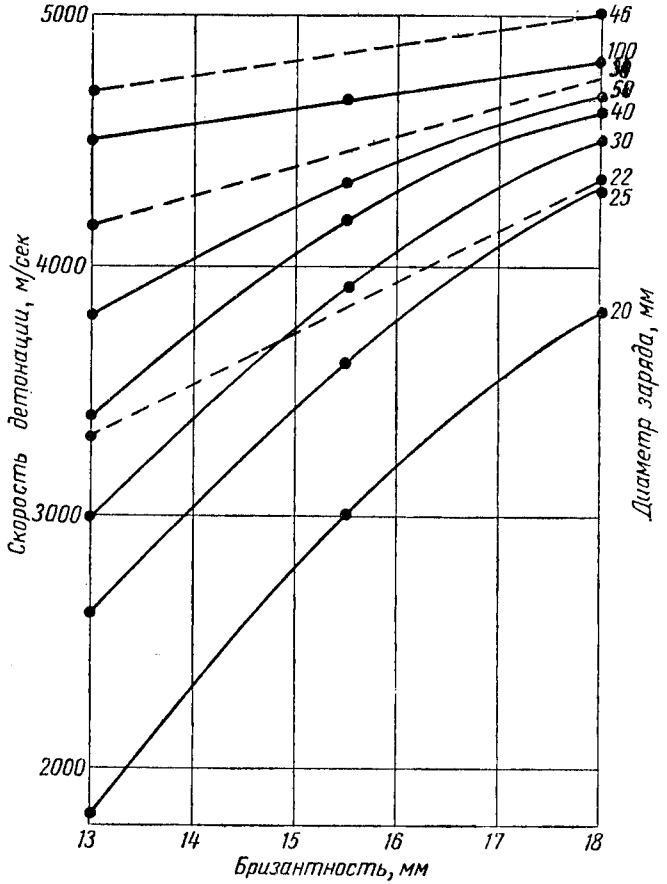


Рис. 48. Скорость детонации аммонита № 6 разной бризантности при плотности 1 *г/см*³ в зарядах различного диаметра: сплошными линиями показаны результаты испытания открытых зарядов, пунктирными — зарядов в стальных трубах

при плотности 1 *г/см*³ представлена на рис. 48. Определение скорости детонации более сложно, чем определение бризантности на свинцовых столбиках, и поэтому не находит широкого применения для характеристики бризантного действия ВВ.

Кумулятивное действие (кумулятивный эффект). Местное действие взрыва заряда ВВ может быть изменено, если в торце заряда, соприкасающемся с преградой, будет сделано конусообразное, сферическое, параболическое или другое подобное углубление. В этом случае получается повышенное пробивное действие заряда ВВ, ко-

торое можно усилить, если в указанное углубление вставить металлический колпачок. Характер местного действия зарядов сплошного и с выемками показан на рис. 49.

Явление усиления пробивного действия заряда ВВ с помощью

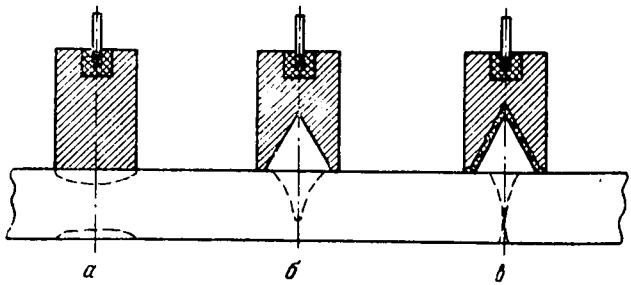


Рис. 49. Пробивное действие обычного и кумулятивных зарядов: *а* — с плоским торцом; *б* — с конической выемкой; *в* — с конической выемкой, облицованной тонкой стальной оболочкой

углубления называют кумуляцией (от латинского слова cumulatio—что означает концентрировать, увеличивать, суммировать).

Явление кумуляции впервые было обнаружено русским ученым М. М. Боресковым в 1864 г., а в 1865 г. использовано капитаном Д. И. Андриевским при создании капсюля-детонатора.

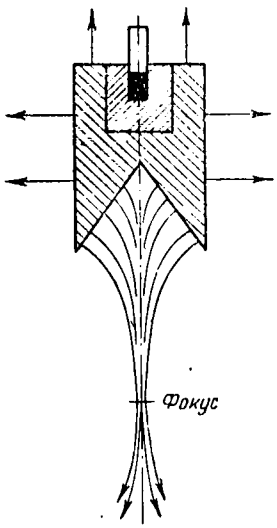


Рис. 50. Схема формирования кумулятивной струи при взрыве заряда ВВ

Особенно широкое применение кумулятивный эффект получил во время второй мировой войны в так называемых кумулятивных боеприпасах, используемых для поражения бронированных целей. При взрыве заряда с кумулятивной выемкой продукты взрыва той части ВВ, которая прилегает к выемке, разлетаясь вначале перпендикулярно к поверхности заряда, затем уплотняются и приобретают большую скорость в направлении оси выемки.

Направленный поток уплотненных продуктов взрыва вдоль оси выемки называют кумулятивной струей (рис. 50). Скорость движения кумулятивной струи выше скорости детонации ВВ и достигает вблизи заряда 10 000 *м/сек*. Давление в кумулятивной струе превышает 100 000 *кг/см*^{2}.

Если кумулятивная выемка имеет металлическую облицовку (колпачок), то последняя под действием продуктов взрыва обжимается и часть металла облицовки образует металлическую кумулятивную струю.

Кумулятивная струя не на всем своем протяжении имеет одинаковые показатели плотности, давления и скорости движения. На некотором расстоянии от заряда плотность, давление и скорость струи достигают максимума, а диаметр струи в этом месте становится наименьшим. Это место струи называют фокусом (см. рис. 50), а расстояние от торца заряда до фокуса струи—фокусным расстоянием. За фокусом по мере удаления от заряда скорость, давление и плотность в кумулятивной струе падают и струя постепенно рассеивается. Пробивное действие кумулятивного заряда по мере рассеивания струи снижается.

Так как в формировании кумулятивной струи принимают участие только находящиеся вблизи выемки слои ВВ, то те заряды, которые предназначаются к использованию в качестве пробивных, изготовляют такой формы, чтобы расход ВВ был минимальным. Пробивное действие кумулятивных зарядов зависит от свойств ВВ, формы и размеров кумулятивной выемки, материала и толщины облицовки, расстояния заряда от пробиваемого объекта. Из свойств ВВ наибольшее положительное значение имеет скорость детонации и плотность ВВ. О действии кумулятивных зарядов, начиная с 1910 г., существовало много гипотез. Современная теория кумулятивного действия зарядов разработана советскими учеными М. А. Лаврентьевым и Г. И. Покровским.

В годы Великой Отечественной войны и первые послевоенные годы делалось много попыток использовать кумулятивный эффект в горно-взрывном деле. В зарубежной и отечественной литературе были утверждения, что применение кумулятивных зарядов увеличивает коэффициент использования шпуров (КИШ) при проходках в шахтах, увеличивает выход горной массы при взрывах скважинами на карьерах и улучшает дробление басм накладными зарядами.

Однако более детальные исследования показали, что действию кумулятивных зарядов приписывался эффект, получаемый за счет других факторов, не связанных с конфигурацией зарядов.

Установлено, что применение кумулятивных зарядов в горном деле целесообразно только в некоторых специальных случаях, когда требуется получить пробивное, а не дробящее действие ВВ.

С помощью кумулятивных зарядов можно проходить шпуры диаметром 40—80 *мм* и глубиной 1—1,5 *м*. Но проходка шпуров таким способом значительно дороже, чем бурение их. Поэтому использовать кумулятивные заряды для проходки шпуров следует только в тех случаях, когда невозможно применить механизмы, а бурить вручную нельзя ввиду повышенной крепости пород, например, в определенных условиях геологоразведочных работ.

Дробящий и раскалывающий эффекты кумулятивных зарядов не превышают эффекта взрыва сплошных зарядов, а иногда и ниже его.

Одно время предполагали, что, применяя патроны с кумулятивными выемками, можно получить увеличение скорости детонации заряда. Однако прямые опыты с рядом промышленных ВВ показали, что скорость детонации заряда, состоящего из патронов или шашек с кумулятивными выемками, не превышает скорости детонации такого же заряда, состоящего из сплошных патронов или шашек.

ГЛАВА XI

БЕЗОПАСНЫЕ РАССТОЯНИЯ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ВЗРЫВОВ И ХРАНЕНИИ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ

Места производства взрывов и хранения взрывчатых веществ должны быть достаточно удалены от жилых и производственных построек, железных дорог и других административных и бытовых сооружений, чтобы они не пострадали от разрушительного действия взрыва.

Разрушительное действие ВВ может передаваться на некоторое расстояние от места взрыва по воздуху воздушной ударной волной, а по грунту—в виде колебаний, называемых сейсмическими волнами.

Кроме того, на сравнительно небольших расстояниях от места взрыва может представлять опасность разлет кусков взрываемой среды, а также передача детонации другим зарядам ВВ.

При проектировании размещения отдельных хранилищ ВВ на территории склада необходимо знать расстояние возможной передачи детонации от одного заряда или хранилища ВВ к другому.

Для расчетов безопасных расстояний обычно пользуются эмпирическими формулами, выражающими зависимость радиуса опасного действия взрыва от веса взрываемого или хранимого заряда ВВ. Однако для различной мощности и для разных условий взрывания или хранения ВВ зависимость между основными величинами, т. е. радиусом опасного действия и весом ВВ, не одинакова.

Зоны, опасные по разлету кусков породы при взрывах, устанавливают опытным путем.

Безопасные расстояния по передаче детонации. Расстояния, обеспечивающие невозможность передачи детонации от заряда к заряду ВВ, называют безопасными по передаче детонации и определяют по формуле:

$$r_д = K_д \sqrt{Q},$$

где: $r_д$ — безопасное расстояние по передачи детонации, *м*;

$K_д$ — коэффициент пропорциональности, зависящий от свойств ВВ и условий их хранения;

Q — вес ВВ в хранилище или штабеле, *кг*.

Для ВВ, более восприимчивых к детонации, имеющих высокие показатели бризантного действия, скорости детонации, фугасности и способных создавать ударную волну с большим скачком давления и плотности, величина коэффициента $K_д$ будет больше.

Если в хранилище находится не одно, а несколько видов ВВ, то для каждого из них должен быть принят свой коэффициент, и тогда формула приобретет вид:

$$r_д = \sqrt{K^2_{д_1} q_1 + K^2_{д_2} q_2 + \ldots + K^2_{д_n} q_n},$$

где: q_1, $q_2 \ldots q_n$ — вес каждого вида хранимых ВВ;

$K_{д_1}$, $K_{д_2} \ldots K_{д_n}$ — коэффициенты для каждого вида ВВ.

Если в смежных хранилищах находятся различные ВВ, или одинаковые ВВ, но в разных количествах, то следует найти безопасное расстояние для каждого из этих хранилищ и для проектирования территории склада принять большее из них.

Коэффициенты, необходимые для вычисления безопасных расстояний, находят в таблицах, составленных на основании опытных данных.

Для некоторых ВВ коэффициенты, принятые «Едиными правилами безопасности при ведении взрывных работ», приведены в табл. 15.

Таблица 15

Значения коэффициентов $K_д$ для некоторых ВВ

Активный заряд		Пассивный заряд		Значение $K_д$
Вид ВВ	Условия хранения	Вид ВВ	Условия хранения	
Аммониты и порошкообразные нитроглицериновые ВВ	Открытый заряд на площадках и в легких сооружениях	Аммониты и порошкообразные нитроглицериновые ВВ	Открытый заряд	0,25
То же	То же	То же	Обвалованное хранилище	0,15
»	Обвалованное хранилище	»	Открытый заряд	0,15
»	То же	»	Обвалованное хранилище	0,10
»	Открытый заряд	Тротил	Открытый заряд	0,40
»	То же	»	Обвалованное хранилище	0,30
»	Обвалованное хранилище	»	Открытый заряд	0,30
»	То же	»	Обвалованное хранилище	0,20
Тротил	Открытый заряд	Аммониты и порошкообразные нитроглицериновые ВВ	Открытый заряд	0,80
То же	То же	То же	Обвалованное хранилище	0,60
»	Обвалованное хранилище	»	Открытый заряд	0,60
»	То же	»	Обвалованное хранилище	0,40
»	Открытый заряд	Тротил	Открытый заряд	1,20
»	То же	»	Обвалованное хранилище	0,90
»	Обвалованное хранилище	»	Открытый заряд	0,90
»	То же	»	Обвалованное хранилище	0,50

Безопасные расстояния по действию воздушной ударной волны. Воздушная ударная волна (см. главы 5 и 10) вблизи места взрыва распространяется со скоростью порядка нескольких тысяч метров в секунду, имея давление на фронте, измеряемое сотнями и тысячами

атмосфер. Некоторые характеристики ударных воздушных волн приведены в табл. 16.

Таблица 16

Некоторые расчетные характеристики ударных воздушных волн

Давление, *атм*	Скорость распространения ударной волны, *м/сек*	Скорость движения воздуха за фронтом ударной волны, *м/сек*	Температура воздуха на фронте волны, °К	Отношение плотности воздуха на фронте волны к начальной плотности воздуха
2	452	175	336	1,63
5	608	452	482	2,84
10	978	725	705	3,88
100	3020	2590	3860	7,06
1000	9310	8450	14000	10,8

Опытным путем установлено, что максимальное давление вблизи очага взрыва обратно пропорционально кубу радиуса, а на больших расстояниях от очага взрыва обратно пропорционально величине несколько большей, чем первая степень радиуса. Следовательно, образовавшаяся при взрыве воздушная ударная волна на ближайших к месту взрыва участках затухает довольно быстро (снижается давление, скорость и другие характеристики), а затем затухание волны идет медленнее.

Разрушительное действие, которое может произвести воздушная ударная волна, зависит не только от интенсивности волны, но и от расположения, размеров и формы разрушаемого объекта (преграды).

Давление, производимое воздушной ударной волной на преграду, зависит от угла, образуемого направлением распространения волны и воспринимающей поверхностью. Если волна скользит вдоль поверхности преграды, то давление на преграду равно давлению в ударной волне. Если угол между направлением распространения волны и воспринимающей поверхностью больше нуля, то давление, испытываемое преградой, становится больше, чем давление в волне. Максимального значения оно достигает при падении ударной волны на преграду под углом 90°.

При воздействии волны большой интенсивности величина давления, воспринимаемого преградой, может превышать давление в воздушной ударной волне в 11 раз. Давление, испытываемое преградой при воздействии волны малой интенсивности, может быть в 2 раза выше давления на фронте ударной волны.

Если размеры преграды малы, то воздух, сжатый волной у преграды, обтекает ее. В результате явления обтекания давление на преграду падает. Этим объясняется большая взрывостойкость малых (обтекаемых) преград по сравнению с большими, имеющими такую же механическую прочность, как и малые преграды.

За время воздействия давления на преграду она успевает приобрести некоторое количество кинетической энергии, которая уже после окончания периода действия воздушной ударной волны вызывает отклонение или деформацию преграды.

Безопасными называют расстояния, на которых воздушная ударная волна теряет способность создавать опасные воздействия на те или иные объекты.

Расстояния, безопасные по действию воздушной ударной волны, определяют, задаваясь допустимыми воздействиями на охраняемые от разрушения объекты.

Для расчета таких расстояний от мест ведения взрывных работ в «Единых правилах безопасности при ведении взрывных работ» дается формула:

$$r_в = K_в \sqrt{q},$$

где: $r_в$—безопасное расстояние, *м*;

$K_в$ —коэффициент, учитывающий условия взрыва и интенсивность допустимых разрушений;

q—вес взрываемого заряда ВВ, *кг*.

Значения коэффициента $K_в$ приводятся в специальных таблицах, выдержка из которых дана в табл. 17.

Таблица 17

Значение коэффициента $K_в$ для некоторых случаев расчета безопасных расстояний по действию воздушной ударной волны

Возможные разрушения	$K_в$ для различных условий взрыва			
	открытый заряд	заряд углубленный		
		на свою высоту	с расчетом на показатель действия взрыва	
			$n=3$	$n=2$*
Полное отсутствие повреждений	50—150	10—40	5—10	2—5
Случайные повреждения застеклений . .	10—30	5—9	2—4	1—2
Пролом прочных кирпичных стен, полное разрушение коммунальных и промышленных сооружений, повреждение железнодорожных мостов и полотна	1,4	Разрушения в пределах воронки выброса		

* n—показатель действия взрыва, выражающий отношение радиуса воронки данного взрыва к линии наименьшего сопротивления (глубине воронки).

Безопасные расстояния от складов рассчитывают по той же формуле, что и для взрывных работ. Но так как условия хранения ВВ на складах обеспечивают чрезвычайно малую вероятность их взрыва, то коэффициенты $K_в$ могут быть приняты более низкими, чем приведенные в табл. 17.

Для определения зоны, безопасной по действию воздушной ударной волны на человека, пользуются формулой $r_в = 5 \div 10 \sqrt{q}$,

где q—вес взрываемого открытого заряда. При нахождении людей в блиндажах расстояние может быть сокращено в 1,5 раза.

Безопасные расстояния по сейсмическим воздействиям при взрывах. В результате взрыва ВВ в грунте за сферой разрушения продолжают происходить колебания грунта (среды), но они настолько малы, что вызываемые ими сжатия грунта не выходят за пределы его упругости. Волна взрыва переходит в упругие сейсмические волны, которые в отличие от волны в воздухе имеют не только продольные волны сжатия и разрежения, но и поперечную волну сдвига. Так как грунт представляет собой среду, неоднородную по плотности и упругим свойствам, то в нем всегда создаются условия для многочисленных отражений и преломлений сейсмических волн. При выходе на поверхность земли сейсмические волны обусловливают появление волн, аналогичных волнам на поверхности воды. Продолжительность колебаний грунта, выведенного из равновесия взрывом, в тысячи раз превосходит время действия на грунт продуктов взрыва. Интенсивность смещения грунта под действием сейсмических волн является функцией отношения $\sqrt[3]{\frac{q}{r}}$, где q—вес взрываемого заряда, а r—расстояние от места взрыва.

Для определения сейсмически опасных зон должны быть учтены интенсивность колебаний грунта, зависящая от веса, свойств и условий взрывания ВВ, и динамические свойства охраняемых сооружений.

«Единые правила безопасности при ведении взрывных работ» предусматривают расчет расстояний, на которых колебания грунта, вызванные взрывами, становятся безопасными для зданий и сооружений, по следующей формуле:

$$r_c = \frac{K_c}{\sqrt[3]{n}} \cdot \sqrt{q},$$

где: r_c—сейсмически безопасное расстояние от места взрыва, *м*;

K_c—коэффициент, зависящий от свойств грунта в местах взрыва, характеристики и расположения охраняемых зданий и сооружений;

n—показатель действия взрыва;

q—суммарный вес взрываемых одновременно зарядов ВВ, *кг*.

Значение коэффициента K_c находят по соответствующим таблицам.

Если одновременно взрываемые заряды расположены на больших расстояниях друг от друга или взрыв нескольких зарядов производится с некоторыми интервалами по времени, в расчетную формулу для безопасных расстояний вносят соответствующие поправки.

Следует отметить, что сейсмическое воздействие даже самых крупных промышленных взрывов ничтожно мало по сравнению с воздействием землетрясений и локализовано на сравнительно небольших площадях, примыкающих к месту взрыва.

ЗАДАЧИ

1. Определить безопасное по детонации расстояние между двумя поверхностными необвалованными хранилищами аммонита емкостью 40 и 60 *т*.
2. Определить безопасное по детонации расстояние между штабелем аммонита весом 80 *т* и обвалованным хранилищем тротила емкостью 60 *т*.
3. Определить расстояние, при котором гарантируется полное отсутствие повреждений при взрыве заряда ВВ весом 800 *кг* при $n = 3$.
4. Определить расстояние, при котором гарантируется полное отсутствие повреждений при взрыве открытого заряда весом 80 *кг*.

ГЛАВА XII

ОСНОВЫ ТЕОРИИ ПРЕДОХРАНИТЕЛЬНЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ

Взрывные работы нашли широкое применение при добыче каменного угля. Однако угольная промышленность предъявляет ко взрывчатым веществам особые требования. Эти требования диктуются в первую очередь опасностью применения ВВ в угольных шахтах, в атмосфере которых часто содержится метан или угольная пыль.

Энергия, выделяющаяся при взрыве ВВ в шпурах, лишь частично расходуется на совершение механической работы. Неиспользованная часть энергии может оказаться достаточной для того, чтобы вызвать вспышку и взрыв метано-воздушной или пыле-воздушной смеси в шахте.

Одним из важнейших мероприятий для обеспечения безопасности работ в угольных шахтах, опасных по газу и пыли, является применение специальных взрывчатых веществ, а также средств и способов взрывания, уменьшающих вероятность воспламенения рудничной атмосферы.

Такие взрывчатые вещества называют *предохранительными* или по старой терминологии *антигризутными* (от французского слова grisou—метан).

ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О МЕХАНИЗМЕ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ РУДНИЧНОЙ АТМОСФЕРЫ

Рудничный газ, выделяющийся в атмосферу подземных выработок при добыче угля, содержит главным образом метан и некоторое количество других горючих и инертных газов. Содержание метана в рудничной атмосфере достигает иногда 20%.

Метано-воздушные смеси, содержащие 5—15% метана, способны к самораспространяющимся реакциям с выделением тепла и с резким подъемом давления.

Взрыв метано-воздушной смеси может быть вызван нагреванием смеси или поджиганием ее точечным источником тепла (пламя, искра и т. п.).

Происходящая при этом реакция может быть выражена уравнением:

$$CH_4 + 2O_2 = 2H_2O + CO_2.$$

Установлено, что реакция окисления метана фактически протекает значительно сложнее, чем это показано в приведенном суммарном уравнении. Окисление метана идет с образованием различных промежуточных продуктов и завершается не мгновенно.

По вопросу о причинах воспламенения метано-воздушных смесей в шахтах при ведении взрывных работ существуют различные теории и гипотезы.

Французские исследователи Малляр и Ле-Шателье, проведя фундаментальные исследования процессов самовоспламенения смесей горючих газов с воздухом под влиянием теплового импульса и от взрыва ВВ, пришли к следующим заключениям.

Воспламенение метано-воздушной смеси происходит от соприкосновения этой смеси с пламенем взрыва. Минимальная температура вспышки метано-воздушной смеси 650°, но воспламенение при этой температуре происходит с задержкой в 10 сек. Чем выше температура, тем короче период задержки.

Температура взрыва ВВ значительно выше минимальной температуры воспламенения метано-воздушной смеси (даже у специальных предохранительных ВВ она составляет 1700—2000°). Но если время воздействия высокой температуры будет короче времени задержки вспышки, последняя может не произойти.

В этом заключается основной принцип теории, которую можно назвать «температурной», так как главное в ней сопоставление температур взрыва с температурой воспламенения метано-воздушной смеси. Согласно этой теории взрывчатые вещества являются тем более безопасными, чем ниже температура их взрыва и меньше продолжительность пламени.

Исследования фотографий пламени взрыва, полученных на неподвижной и вращающейся пленках, позволили сравнить интенсивность и продолжительность свечения пламени взрыва различных ВВ и классифицировать их по указанному принципу.

Величина пламени и продолжительность свечения при взрыве в мортире зависят не только от свойств ВВ, но и величины заряда. Они получаются тем больше, чем больше заряд ВВ. В связи с этим возникло понятие о предельной величине зарядов, допустимых к применению в шахтах, атмосфера которых содержит метан. Позже была доказана ошибочность ограничения веса заряда ВВ при использовании их в шахтах.

Другой французский ученый Одибер, развивая положения Малляра и Ле-Шателье, объяснял воспламенение метана в воздухе от взрыва ВВ следующим образом.

Во время взрыва ВВ газообразные продукты взрыва выбрасываются в атмосферу и смешиваются с ней. При этом температура продуктов взрыва падает, а состав их изменяется. Начиная с некоторого момента содержание кислорода и метана в образовавшейся

смеси становится настолько большим, что наступает возможность самовоспламенения, если температура смеси при этом из-за смешения с воздухом не упала ниже температуры воспламенения. При таком представлении о механизме воспламенения метано-воздушной смеси безопасность ВВ должна определяться количеством тепла, приходящимся на единицу объема газообразных продуктов взрыва, и не зависеть от величины заряда.

Согласно Одиберу, состав предохранительных ВВ должен быть таким, чтобы количество тепла, выделяющегося при взрыве на один моль газообразных продуктов, было меньше «теплоты воспламенения» смеси метана, воздуха и продуктов взрыва. Величина «теплоты воспламенения» зависит от состава газов взрыва, а значит и от состава ВВ. Теплоту взрыва на один моль газообразных продуктов можно понизить введением в состав ВВ инертных теплопоглощающих веществ—пламегасителей (например поваренной соли). Таковы основные принципы «тепловой» теории Одибера.

Современные предохранительные ВВ содержат от 15 до 30% поваренной соли или хлористого калия. Дальнейшее увеличение содержания инертных солей в составе ВВ приводит к значительному понижению взрывного эффекта и ухудшению детонационной способности ВВ. Ухудшение детонационной способности обусловливает опасность перехода детонации в горение, что в свою очередь может явиться причиной воспламенения метано-воздушной смеси.

Для повышения предохранительных свойств ВВ без ухудшения их детонационной способности заряды ВВ помещают в специальные оболочки из пламегасителей. Наша промышленность выпускает предохранительные ВВ в оболочках из хлористого калия.

Однако ввиду сложности изготовления таких зарядов и возможности нарушения целостности оболочки при заряжании шпуров изыскиваются другие методы повышения безопасности ВВ. В последние годы в Англии все шире применяются так называемые эквивалентные предохранительные ВВ, в которых содержание пламегасителей эквивалентно суммарному содержанию пламегасителей в патронах с предохранительными оболочками, а количество нитроэфиров увеличено.

В некоторых странах (Германия, Голландия) недавно стали применять «сверхбезопасные» предохранительные ВВ, в составе которых имеются натровая селитра и хлористый аммоний. Предполагается, что при взрыве таких ВВ в окружении породы и при наличии хорошей забойки происходят полное превращение ВВ и обменная реакция между натровой селитрой и хлористым аммонием с образованием аммиачной селитры, повышающей эффект взрыва. При случайном обнажении заряда условия детонации ухудшаются и реакция взрывчатого превращения не завершается. Натровая селитра не взаимодействует с хлористым аммонием и так же, как хлористый аммоний, играет роль теплопоглотителя. При этом тепловой эффект взрыва становится настолько малым, что продукты взрыва при смешении с метано-воздушной смесью не вызывают ее воспламенение.

Развитие теоретических представлений в области воспламенения метано-воздушных смесей связано с изучением явления катализа при горении и взрыве.

Значительный вклад в эту область исследований внесли советские ученые Н. Н. Семенов, К. К. Андреев и др.

Л. В. Дубнов, используя основные принципы «температурной и тепловой» теории, связывает изменение задержки вспышки с изменением температуры и давления в процессе смешения продуктов

взрыва с метаном и воздухом по Одиберу. Величина задержки вспышки зависит не только от температуры и соотношения метана и воздуха в смеси. В настоящее время установлено, что некоторые примеси затрудняют течение реакции окисления метана. По данным Дубнова, обработка реакционного кварцевого сосуда растворами хлоридов щелочных металлов приводит к увеличению температуры вспышки метано-воздушной смеси. Температура вспышки повышается при обработке сосуда раствором хлористого натрия на 20°, а хлористого калия—на 90°. Время задержки вспышки также значительно увеличивается.

Вещества, тормозящие реакцию окисления метана—антикатализаторы, находят применение в качестве компонентов предохранительных ВВ.

Поваренная соль или хлористый калий в составе предохранительных ВВ играют роль теплопоглотителей, снижающих температуру взрыва, и одновременно являются антикатализаторами, повышающими температуру воспламенения метано-воздушной смеси или увеличивающими период задержки вспышки.

Хлористый калий считается более эффективным антикатализатором по сравнению с поваренной солью, поэтому, несмотря на свою более высокую стоимость, он находит применение в качестве компонента предохранительных ВВ.

Наряду с антикатализаторами известны вещества, ускоряющие реакцию окисления метана. К числу таких веществ относится двуокись азота. Будучи примешана к метано-воздушной смеси, она ускоряет вспышку последней при быстром нагревании реакционного сосуда. При этом следует учитывать, что при быстром нагревании смеси до температуры вспышки двуокись азота может не успеть полностью диссоциировать на окись азота и кислород, которые не являются катализаторами реакции окисления.

Иначе обстоит дело, если источником окислов азота являются продукты взрыва ВВ. В этом случае при температуре взрыва существование двуокиси азота исключено (см. главу 8, рис. 33). К моменту смешения газов с метаном в смеси вместо двуокиси азота будет находиться довольно инертная окись азота.

С другой стороны, можно предполагать, что промежуточные продукты реакции взрыва ВВ, наличие которых обусловлено незавершенностью вторичных реакций, оказывают влияние на реакцию окисления метана. Это можно заключить из общей закономерности влияния хлоридов щелочных металлов на образование ядовитых газов (NO и CO) при взрывании зарядов в бомбе Бихеля в окружении песка и на воспламеняемость метано-воздушных смесей. Опытами одного из авторов книги установлено, что наиболее эффективными в отношении снижения образования ядовитых газов из числа инертных солей, являются добавки хлоридов калия и натрия, т. е. тех солей, введение которых в состав ВВ снижает вероятность вспышки метано-воздушной смеси.

Выше были рассмотрены основные положения температурно-тепловых теорий, дополненных современными представлениями о ката-

литическом влиянии инертных солей в составе предохранительных ВВ.

Некоторые ученые выдвигали на первый план иные причины воспламенения метано-воздушных смесей при ведении взрывных работ.

Немецкий ученый Бейлинг приписывал воспламенение метана в рудничной атмосфере действию разбрасываемых при взрыве твердых горячих частиц ВВ. В качестве практических мероприятий, уменьшающих вероятность воспламенения рудничной атмосферы, рекомендовалось обеспечить такие свойства взрывчатых веществ и такие условия взрывания, чтобы горящие частицы не попадали в шахтную атмосферу. Это означало, что надо применять ВВ с малой длиной разгона детонации и хорошей способностью к передаче детонации. Такие качества можно достигнуть в результате тонкой обработки ВВ и введения в их состав сенсибилизаторов (например, нитроглицерина).

В шахтах ВВ следует применять с плотной забойкой. Для уменьшения разлета частиц на участке разгона детонации рекомендуется использовать более мощные капсюли-детонаторы (азидогексогеновые или азидотэновые).

Повышение детонационной способности предохранительных аммонитов путем улучшения качества технологической обработки и введения в их состав сенсибилизирующих добавок типа нитроглицерина важно и с другой точки зрения. При заряжании шпуров не исключена возможность пересыпания промежутков между патронами угольной мелочью или кусочками породы. Опытами в специальной мортире установлено, что для предохранительного аммонита № 8, не содержащего в своем составе нитроэфиров, пересыпание промежутков между патронами угольной пылью является причиной опасного выгорания ВВ в шпурах.

Некоторые авторы основной причиной воспламенения метано-воздушных смесей считают действие ударных волн в процессе их сложного движения и отражения в условиях шахты.

Можно считать, что все указанные факторы оказывают влияние на возникновение взрыва в шахтах. Но основным, по-видимому, является воспламенение от смешения горячих газов взрыва с рудничной атмосферой.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРЕДОХРАНИТЕЛЬНЫХ СВОЙСТВ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ

Для оценки предохранительных свойств ВВ применяют опытный штрек (рис. 51), представляющий собой трубу *1* из котельного железа длиной 10—30 *м* с поперечным сечением 1,65—2 *м*. Почти вся труба, опирающаяся на бетонное основание, расположена на открытом воздухе; только часть ее на протяжении 3—5 *м* входит в кирпичное помещение. Расположенный в помещении конец трубы имеет днище из такого же железа. В днище сделано отверстие, диаметр которого равен диаметру мортиры *2*, установленной на тележке и подкатываемой к днищу трубы во время испытаний.

Мортира представляет собой массивный стальной цилиндр диаметром 550 *мм* и длиной 1140 *мм*, внутрь которого запрессован цилиндр из высоколегированной хромоникелевой стали. По оси внутреннего цилиндра высверлен канал диаметром 55 *мм* и длиной 900 *мм*, служащий для помещения заряда ВВ.

Часть трубы перекрывается бумажной диафрагмой *3* или автоматически открывающейся перед взрывом шторой. При помощи этой перегородки в трубе создают изолированную камеру *4* объемом 10 $м^3$. Эту камеру при испытаниях наполняют метано-воздушной смесью, содержащей 8—10% метана, или же создают взвесь угольной пыли в воздухе из расчета 300 *г* пыли на 1 $м^3$ воздуха.

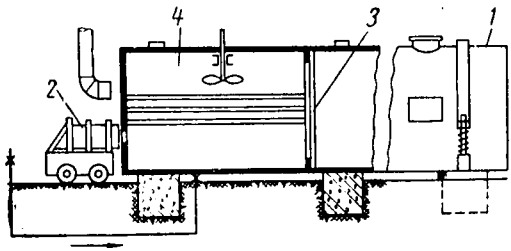


Рис. 51. Схема опытного штрека

Испытания ВВ производят раздельно по газу и пыли. При испытании ВВ по газу в мортиру помещают заряд весом 600 *г* (патроны в заводских оболочках), снабженный электродетонатором. Отверстие мортиры закрывают глиняной забойкой толщиной 1 *см*. Мортиру подкатывают к днищу трубы, замыкая ею изолированную камеру штрека. В камеру впускают метан до тех пор, пока анализ не покажет, что содержание его в воздухе находится в нужных пределах. После этого производят взрыв.

О воспламенении или невоспламенении метана в камере штрека судят либо по показаниям гальванометра, соединенного с термопарой, установленной внутри штрека, либо по непосредственным наблюдениям пламени в окнах и у открытого конца штрека.

Для каждого ВВ производят 10 испытаний с зарядами указанного веса, причем ни в одном случае не должно быть воспламенения газа.

Аналогичным образом производят испытание на безопасность по воспламенению угольной пыли. В этом случае забойку не применяют, а испытуемый заряд берут весом 700 *г*.

Описанный метод испытания не дает возможности с достаточной точностью выявить различие в предохранительных свойствах отдельных предохранительных ВВ.

Для сравнительной оценки предохранительных ВВ можно использовать данные по числу воспламенений метана в заданном количестве параллельных опытов в штреке с зарядами одинаковой величины. Иногда о большей или меньшей безопасности того или иного ВВ судят по максимальной величине заряда, невоспламеняющего метан при определенном числе опытов. Чем больше вес заряда, не вызывающего воспламенения метана в камере штрека, тем более безопасным считают ВВ.

При взрывании зарядов ВВ в практических условиях применения энергия ВВ в значительной своей части превращается в меха-

ническую работу. Поэтому взрывные газы выходят в атмосферу выработок с пониженной температурой. Если бы было исключено проникновение горячих газов в атмосферу выработок через трещины в породе или при плохой забойке шпуров, вероятность воспламенения метана, даже при использовании не предохранительных ВВ, была бы близка к нулю. Кроме того, практически не исключены случаи частичного обнажения зарядов при взрыве соседних шпуров. Естественно, в этих условиях вероятность воспламенения метана будет зависеть от свойств ВВ.

Известны попытки оценивать предохранительные свойства ВВ взрыванием свободно подвешенных зарядов в оболочках из кварцевого песка в атмосфере метано-воздушной смеси. Предполагается, что вероятность воспламенения метано-воздушной смеси в этом случае будет зависеть от свойств ВВ и главным образом от той энергии взрыва, которая остается за вычетом работы по разбрасыванию оболочки. Предохранительные свойства ВВ при этом методе испытания могут быть оценены по минимальной толщине оболочки, при которой не получается воспламенения метано-воздушной смеси, или по числу воспламенений из определенного количества опытов при одинаковой толщине оболочки.

ГЛАВА XIII

ОКСИЛИКВИТЫ

Оксиликвитами* называют ВВ, состоящие из горючих веществ, пропитанных жидким кислородом или смесью его с 15—30% жидкого азота.

Под оксиликвитами понимают целую группу ВВ, взрывчатые свойства которых могут меняться в очень широких пределах.

КОМПОНЕНТЫ ОКСИЛИКВИТНЫХ ВВ

Все горючие вещества, применяемые для приготовления оксиликвитов, можно разделить на две большие группы. К первой группе относятся углеродистые горючие вещества—древесный и активированный уголь, сажа. Во вторую группу входят целлюлозные поглотители — мох-сфагнум, торф, костра, древесная мука и др.

Взрывчатые свойства оксиликвитов зависят главным образом от способности горючих веществ поглощать и удерживать в своей массе жидкий кислород и от калорийности этих горючих веществ. Углеродистые поглотители в этом отношении имеют преимущества перед целлюлозными. Они содержат в своем составе 90—95% углерода. Пористость их выше, жидкий кислород они поглощают быстрее (примерно в 1,5 раза в одинаковых условиях пропитки) и удерживают его дольше. Однако чувствительность к механическим воздействиям и воспламеняемость оксиликвитов, приготовленных на углеродистых поглотителях, выше, чем у оксиликвитов на целлюлозных поглотителях и, следовательно, в обращении они более опасны.

Целлюлозные поглотители, содержащие в органической массе около 50% углерода, 3—5% водорода и около 40% кислорода, имеют обычно волокнистое строение и медленнее пропитываются жидким кислородом. Некоторые из них при очень долгом пропитывании

* Название оксиликвиты условно и состоит из двух латинских слов—oxygenium—кислород и liquid—жидкий, указывающих на наличие в веществе жидкого кислорода.

все же способны поглотить столько кислорода, сколько требуется для полного окисления всех горючих элементов.

Патроны с некоторыми сортами торфа поглощают достаточное количество жидкого кислорода, однако он не удерживается в них и при вынимании патронов из термоса бо́льшая часть жидкого кислорода очень быстро (в течение 2—3 мин.) вытекает.

Поглотительная способность всех применяемых горючих поглотителей, особенно целлюлозных, зависит от степени их измельчения. С измельчением поглотителей общая поверхность их растет и количество открытых пор, способных удерживать жидкий кислород, увеличивается. Однако в сильно измельченных поглотителях проникание жидкого кислорода в глубь массы затрудняется и пропитываются такие патроны значительно медленнее, чем патроны с малоизмельченными или совсем неизмельченными поглотителями. Для каждого горючего вещества, используемого в качестве поглотителя, должна быть подобрана наиболее рациональная степень измельчения.

Целлюлозные поглотители легче обрабатывать таким образом, чтобы приготовленные из них патроны не давали пыли, создающей опасность воспламенений и непредвиденных взрывов при изготовлении и применении зарядов.

Кроме указанных двух основных видов поглотителей, в целях повышения температуры взрывчатого разложения оксиликвитов в их состав иногда вводят некоторые металлы и углеводороды (алюминий, нафталин, парафин и некоторые другие).

Второй компонент оксиликвитов — жидкий кислород—представляет собой слегка голубоватую, легко подвижную жидкость с температурой кипения около —183°. Удельный вес его при температуре ниже—183° равен 1,13÷1,14 $г/см^3$.

Жидкий кислород не электропроводен. При переливании жидкого кислорода или при погружении в него и вынимании патронов с горючим возможно накапливание статического электричества, потенциал которого может достигать, как показали опыты, более 8000 *в*. В целях снижения опасности работ с жидким кислородом и оксиликвитами все рабочие, транспортные средства и аппараты заземляют.

Применяемый для приготовления оксиликвитов жидкий кислород должен быть чистым. Категорически запрещается использовать жидкий кислород, содержащий даже незначительные примеси ацетилена (примесь ацетилена может привести к взрыву). Недопустимо также при работе с жидким кислородом и оксиликвитами пользоваться сосудами, загрязненными маслами и органическими веществами, или работать в запыленной горючими веществами атмосфере.

Предприятия, применяющие оксиликвиты, в зависимости от местных условий изготовляют жидкий кислород сами или получают его в готовом виде с ближайших заводов.

В настоящее время есть несколько типов установок для получения жидкого кислорода. Все они основаны на охлаждении очищенного атмосферного возду-

ха до температуры сжижения (—191°) путем периодического сжатия и расширения его с отводом тепла и на последующем разделении (ректификации) жидкого воздуха на жидкий кислород и жидкий азот.

Разделение жидкого воздуха на жидкий азот и жидкий кислород основано на различии температур кипения этих сжиженных газов. Температура кипения жидкого кислорода равна —183°, а жидкого азота —193°.

Жидкий кислород хранят в течение непродолжительного времени и перевозят в специальных сосудах, изготовленных с двойными стенками, между которыми создается вакуум или помещается материал с хорошей теплоизоляционной способностью.

Большие количества жидкого кислорода (20—30 *т*) перевозят в специальных железнодорожных цистернах; меньшие (порядка 1000 *л*) перевозят и хранят в сосудах, называемых танками. Для перевозки и кратковременного хранения малых количеств жидкого кислорода используют сосуды Дюара емкостью 2, 5, 10, 15 и 25 *л*.

Перевозить или хранить жидкий кислород (как и другие сжиженные газы) в герметически закрытых сосудах нельзя.

Потери жидкого кислорода в течение часа в различных целиком заполненных кислородом сосудах составляют: в железнодорожных цистернах 0,11—0,12% их емкости, в танках 0,4—0,7% емкости, а в сосудах Дюара 40—50 *г*. С уменьшением заполнения сосудов жидким кислородом потери возрастают.

ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА ОКСИЛИКВИТОВ

Свойства оксиликвитов непрерывно меняются от момента максимального насыщения поглотителей жидким кислородом до испарения основного его количества.

Оксиликвитный патрон обладает наиболее высоким взрывным действием в тот момент, когда в нем кислорода достаточно, но не больше, чем требуется для полного окисления горючих, т. е. углерода в углекислый газ (CO_2), а водорода — в воду. Пригодным для взрывных работ считается оксиликвитный патрон, в котором кислорода еще достаточно для полного окисления водорода и для окисления углерода до окиси углерода (CO).

Практически оксиликвитные патроны на некоторых поглотителях теряют способность к взрыву и при более высоком содержании кислорода, а другие способны к взрыву и при более низком. Это различие зависит от свойств поглотителя, а также от характера распределения жидкого кислорода в нем.

В то время когда общее количество кислорода уже недостаточно для окисления горючих, в отдельных частях патрона (обычно в нижней и центральной его части) содержание кислорода может быть достаточно большим и, если диаметр этой части патрона выше критического, может произойти взрыв.

Насыщенность оксиликвитного патрона кислородом, при которой возможно полное окисление горючих, принято называть «точкой CO_2», а насыщенность, при которой кислорода достаточно для окисления углерода только до окиси углерода, называют «точкой CO».

Отрезок времени, в течение которого в оксиликвитном патроне удерживается количество кислорода от точки CO_2 до точки CO, обычно называют жизненностью оксиликвитного патрона. Иногда жизненностью оксиликвитного патрона называют весь отрезок времени от извлечения патрона из термоса до точки CO.

В литературе принято характеризовать взрывчатые свойства оксиликвитов теплотой их взрыва, рассчитанной для момента точки CO_2.

Из сравнительной оценки энергии оксиликвитов и энергии других ВВ вытекает, что по запасу энергии оксиликвиты значительно превосходят все применяемые твердые и жидкие взрывчатые вещества. Для оксиликвитов на углеродистых поглотителях теплота взрыва равна 2300—2200 *ккал/кг*, на торфяных поглотителях и сфагнуме 2070—1900 *ккал/кг* и на камыше 1600 *ккал/кг*.

Следовательно, запас потенциальной энергии у оксиликвитов больше, чем у гексогена на 20—70%, а у аммонита № 6—на 60—120%. Такая высокая расчетная теплота взрыва оксиликвитов обычно и приводится в качестве основного достоинства их и безусловного преимущества перед всеми другими промышленными ВВ.

В то же время в практических условиях использования эффект взрыва оксиликвитами мало отличается от эффекта взрыва аммонитами. Это объясняется тем, что взрывание оксиликвитных зарядов производится значительно позже момента точки CO_2.

В настоящее время не существует метода контроля за насыщенностью патронов, помещенных в зарядную камеру. Время, отводимое на заряжание, устанавливается опытным путем на основании определения скорости испарения кислорода из применяемого поглотителя и фактических условий ведения взрывных работ.

Практически при самых благоприятных условиях для оксиликвитов на лучших поглотителях рекомендуется, чтобы патроны для шпуров взрывались не позже чем через 20 мин. после окончания их насыщения, а большие патроны для скважин не позднее чем через 1 час.

Условно принимают, что оксиликвиты на углеродистых поглотителях имеют бризантность порядка 12—20 *мм*, а на целлюлозных поглотителях—8—16 *мм*.

Для полной характеристики того или иного оксиликвита необходимо знать его свойства при разной степени насыщенности поглотителя жидким кислородом. Плотность оксиликвитных патронов при этом колеблется в пределах 0,9—1,2 *г/см*^{3}.

Оксиликвиты на торфе при разной степени насыщения жидким кислородом показывают следующую бризантность:

Содержание кислорода, *г*, на 1 *г* поглотителя	Бризантность, *мм*
2,0	5,3
1,75	15,8
1,5	16,2
1,0	12,6
0,75	9,4

Скорость детонации для оксиликвитов на поглотителях обоих видов находится в пределах от 2000 до 4000 *м/сек*.

Работоспособность, определенная в свинцовой бомбе, колеблется для разных оксиликвитов в пределах 250—600 *см*^{3}. Следует учесть,

что последние показатели нельзя безоговорочно сравнивать с показателями для других ВВ, так как пластические свойства самого свинца зависят от температуры в момент испытания. Сильное охлаждение бомбы при внесении в нее патрона, насыщенного жидким кислородом, безусловно оказывает влияние на получаемые результаты взрыва.

Так же, как и взрывчатые характеристики, чувствительность оксиликвитов к начальным импульсам является величиной переменной. Все оксиликвиты легко воспламеняются. Загорание оксиликвитов в зарядных камерах почти всегда приводит к их взрыву. Оксиликвиты способны загораться не только от луча огня огнепроводного шнура, но и от искр (например, при ударах по искрообразующим породам или при ударах инструментов из черных металлов). Повышение влажности поглотителей до 15—20% несколько снижает чувствительность оксиликвитов.

В целях снижения опасности применения оксиликвитов у нас рекомендуют применять поглотители в брикетированном или прессованном виде. В таком виде поглотители почти не дают пыли и, таким образом, несколько снижается их чувствительность к искре и уменьшается возможность электризации горючей пыли поглотителей в токе испаряющегося в зарядной камере кислорода. Общепризнанным в литературе методом снижения чувствительности оксиликвитов к огню является пропитка поглотителей растворами солей, которые называют огнезащитными. В качестве таких солей чаще всего используют некоторые соли фосфорной кислоты.

Кроме того, некоторые исследователи считают, что если поглотители пропитывать не чистым кислородом, а с примесью 15—30% жидкого азота, то оксиликвитные патроны будут менее чувствительны ко всем первоначальным импульсам.

Чувствительность оксиликвитов к механическим воздействиям выше, чем у аммиачно-селитренных ВВ. Из-за специфических особенностей оксиликвитов (быстрота испарения кислорода из малых зарядов) методика испытания их на чувствительность к удару отличается от методики испытания других ВВ тем, что применяют копры бо́льших размеров, а испытуемую навеску и вес падающего груза увеличивают.

Минимальная высота падения груза весом 25 *кг*, от удара которого может произойти взрыв оксиликвитного патрона диаметром 25 *мм* и высотой 25 *мм* (в момент точки CO_2), составляет для оксиликвитов на саже 5 *см*, для оксиликвитов на древесном угле—10 *см*, а для оксиликвитов на торфе —30 *см*. Введение в состав оксиликвитов металлических порошков повышает их чувствительность к механическим воздействиям.

Оксиликвиты отличаются очень низкой физической стойкостью. Сравнительно небольшая жизненность оксиликвитных патронов еще больше снижается, если оксиликвитные патроны поместить в воду, где повышается интенсивность испарения кислорода. Поэтому оксиликвиты относят к водонеустойчивым веществам, и применение их в обводненных выработках не допускается.

Эффективность оксиликвитов и степень опасности обращения с ними в большой мере зависят от способа заряжания их в зарядные камеры.

Существует два способа заряжания зарядных камер оксиликвитами. Первый и наиболее распространенный способ заключается в том, что заранее подготовленные недалеко от зарядных камер патроны-поглотители пропитывают в термосах жидким кислородом и готовые оксиликвитные патроны помещают в зарядные камеры. В этом случае наиболее опасными являются операции выпимания оксиликвитных патронов из термосов и помещение их в зарядные камеры.

Второй способ заряжания состоит в том, что подготовленные патроны с поглотителями помещают в зарядную камеру, а затем в нее заливают жидкий кислород. Во избежание утечек кислорода по трещинам, почти всегда имеющимся в породе, в некоторых случаях (например, при ведении взрывных работ на Днепрострое) патроны-поглотители помещали в металлические гильзы, в которых удерживался стекающий по пропитываемым патронам кислород. При таком способе заряжания оксиликвитов целесообразно применять только поглотители с хорошими насыщаемостью и пропитываемостью.

В отношении безопасности второй способ превосходит способ заряжания скважин готовыми оксиликвитными патронами, так как в этом случае нет непосредственного обращения людей с готовыми зарядами оксиликвитов. Второй способ обычно применяют при заряжании камерных зарядов.

В целях повышения жизненности оксиликвитных патронов было предложено помещать патроны-поглотители в специальные оболочки, замедляющие процесс испарения кислорода из патрона. Лучшие результаты показали оболочки из хлопковой ваты с толщиной слоя 5 *мм* и из гофрированной бумаги. По данным исследователей, жизненность патронов в оболочках из гофрированной бумаги увеличивается на 50—70%, а в оболочке из хлопковой ваты—на 60—90%. Необходимо учитывать, что с увеличением толщины оболочек плотность заряжания скважин оксиликвитами снижается и эффективность взрывов уменьшается. Кроме того, значительно увеличивается время пропитки патронов.

К выгодам применения оксиликвитов следует отнести возможность использования местного сырья (местные горючие поглотители) и безопасность ликвидации отказов. Кроме того, применение оксиликвитов позволяет исключить дальние перевозки ВВ.

К недостаткам оксиликвитов относят:

а) непостоянство взрывчатых свойств, которые практически нельзя регулировать вследствие низкой жизненности оксиликвитов;

б) высокую чувствительность оксиликвитных зарядов и низкую их температуру (—183°), что повышает опасность в обращении;

в) большую трудоемкость технологических операций подготовки поглотителей и пропитки их жидким кислородом;

г) сравнительно высокую стоимость.

СПОСОБЫ ПРИГОТОВЛЕНИЯ ОКСИЛИКВИТНЫХ ЗАРЯДОВ

Основной и наиболее трудоемкой операцией приготовления оксиликвитных зарядов (если считать, что кислород поступает в готовом виде) является подготовка зарядов из поглотителей.

Подготовка углеродистых поглотителей заключается в измельчении их, отсеивании от пыли и соответствующем доведении влажности до установленного предела (подсушка или увлажнение). В отдельных случаях производят обработку углеродистых поглотителей растворами огнезащитных солей (пропитка с последующей сушкой).

Готовыми поглотителями снаряжают патроны требуемых диаметра и длины.

Подготовку целлюлозных поглотителей ведут без нарушения их волокнистой структуры. Малоразложившийся верховой торф-сфагнум очищают от грубых посторонних примесей, смачивают раствором огнезащитной соли, подсушивают до остаточной влажности 18—20% и прессуют до плотности 0,5 *г/см*^{3}.

Такие поглотители как солому, камыш, торф, ковыль и т. п. подготавливают иначе. Их грубо нарезают и загружают в ролл, где они обрабатываются в присутствии большого количества воды или раствора огнезащитных солей до состояния тонковолокнистой массы. В большинство таких составов для повышения поглотительной способности и улучшения связи волокон добавляют около 20% ваты.

Полученную после обработки в ролле массу отжимают и передают на прессование брикетов. Плотность готовых брикетов составляет приблизительно 0,45 *г/см*^{3}.

Насыщение патронов или брикетов жидким кислородом в зависимости от объема и характера взрывных работ производится на специальных зарядных станциях, непосредственно на карьере, на расстоянии около 100 *мм* от места взрывания или в зарядных камерах.

В качестве инициаторов для оксиликвитных зарядов используют азидотетриловые электродетонаторы (не дающие отказов при низких температурах) или детонирующий шнур.

ГЛАВА XIV

НИТРОСОЕДИНЕНИЯ

ХИМИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ НИТРОСОЕДИНЕНИЙ

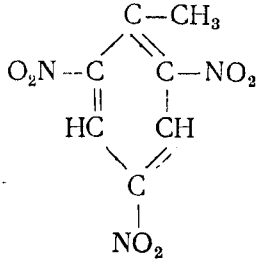
Бо́льшая часть применяемых на практике взрывчатых химических соединений (кроме некоторых инициирующих ВВ) содержит непрочно связанные с углеродным атомом богатые кислородом нитрогруппы NO_2 или нитратные группы ONO_2.

Взрывчатые химические соединения, содержащие нитратную группу, называют нитроэфирами (см. главу 17).

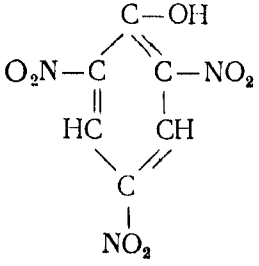
Взрывчатые химические соединения, содержащие нитрогруппу, относят к классу нитросоединений. В этот класс входят такие ВВ как тротил, пикриновая кислота, динитронафталин, гексоген и другие.

Количество нитрогрупп, положение их и связь с другими атомами в молекуле взрывчатого химического соединения могут быть различными. В зависимости от этого имеются различия в химических, физических и взрывчатых свойствах нитросоединений.

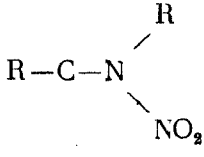
Наибольшее распространение среди взрывчатых химических соединений имеют две группы нитросоединений. В первую группу входят нитросоединения, у которых нитрогруппа связана непосредственно с атомом углерода бензольного кольца. Эта связь в общем виде может быть изображена следующим образом: $R—N\lessdot_{O}^{O}$, где R — радикал органического соединения. Так связаны нитрогруппы с атомами углерода у тринитротолуола (тротила)



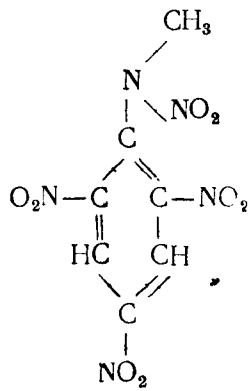
и у тринитрофенола (пикриновой кислоты)



Вторая группа нитросоединений носит название нитраминов. У них нитрогруппа связана с углеродным атомом через азот, т. е.



Применяемый для снаряжения капсюлей-детонаторов тринитрофенилметилнитрамин (тетрил) имеет два вида связи нитрогрупп с углеродными атомами: непосредственную и через азот



ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА НИТРОСОЕДИНЕНИЙ

Нитросоединения, у которых нитрогруппа связана непосредственно с атомом углерода бензольного кольца, отличаются высокой химической стойкостью. Они не способны в обычных условиях хранения к самопроизвольному разложению и самовозгоранию; химический состав и физические свойства нитросоединений остаются практически неизменными. Большинство таких нитросоединений выдерживает нагревание до температуры плавления без заметного химического разложения.

Нитрамины не изменяют своих свойств в условиях нормального хранения и не способны к самопроизвольному разложению и самовозгоранию. Однако их стойкость к нагреванию ниже, чем у нитросоединений, нитрогруппы которых связаны только с углеродными атомами. Так, тетрил, имеющий температуру плавления около 128°, при 130° начинает уже медленно разлагаться, при 140° процесс идет довольно быстро и при длительной выдержке при температуре 140° может произойти самовоспламенение тетрила, тогда как тротил, имеющий температуру плавления около 80°, выдерживает без самовоспламенения нагревание в течение нескольких часов при температуре 240°.

Все нитросоединения не растворимы или мало растворимы в воде и практически не гигроскопичны. Однако вода флегматизирует эти ВВ. Например, кристаллический тротил уже при средней влажности 12% дает отказы. Пикриновая кислота отказывает при средней влажности около 15%.

Как правило, с увеличением числа нитрогрупп в молекулах нитросоединений температура их плавления повышается. Мононитротолуол плавится при температуре около 16°, динитротолуол — около 60°, а перекристаллизованный тринитротолуол — при температуре 80,2°. Наиболее удобны в обращении тринитросоединения, кото-

рые в пределах обычных температур находятся в твердом состоянии.

Взрывчатые свойства нитросоединений, т. е. их восприимчивость к взрыву других взрывчатых веществ, чувствительность к механическим и тепловым воздействиям, скорость детонации, бризантность, работоспособность и температура взрыва, возрастают с увеличением числа нитрогрупп (по мере приближения к нулевому кислородному балансу).

Определенное влияние на свойства нитросоединений оказывает и наличие других заместителей в бензольном ядре, например, метильных (CH_3) или гидроксильных (OH) групп. Однако не все взрывчатые характеристики одинаково изменяются при введении в соединение таких заместителей. Например, если сравнить между собой свойства тринитробензола и тринитротолуола (табл. 18), то окажется, что чувствительность к удару на копре у тринитротолуола выше, чем у тринитробензола, а теплота взрыва, работоспособность, бризантность и скорость детонации у тринитробензола выше, чем у тринитротолуола.

Замечено, что чувствительность к удару на копре зависит от природы заместителей, но она всегда возрастает с увеличением числа заместителей в ядре. Восприимчивость же к взрыву и другие взрывчатые характеристики зависят от характера групп, являющихся заместителями, но, как правило, с увеличением числа заместителей (кроме нитрогрупп)не возрастают, а в ряде случаев даже снижаются.

Работая с нитросоединениями, необходимо иметь в виду, что все они в бо́льшей или меньшей степени ядовиты (токсичны) и действуют на центральную нервную систему и на кровь человека. Отравление может происходить через кожу и дыхательные пути.

Токсичность нитросоединений снижается с увеличением количества нитрогрупп в ядре. В веществах с одинаковым числом нитрогрупп наименьшей токсичностью обладают те вещества, в которых имеется большее количество метильных групп. Так, в ряду нитросоединений — динитробензол, тринитробензол, тринитротолуол и тринитроксилол токсичность падает от первого к последнему. Если работа с динитробензолом без перчаток и без респираторов может вызвать смертельное отравление, то при работе с тротилом применение только марлевых повязок надежно предохраняет даже от самых слабых отравлений.

Наибольшее применение во взрывном деле находят тринитросоединения ароматического ряда, т. е. такие, у которых бензольное ядро связано с тремя нитрогруппами. Ограниченное применение имеют динитросоединения, а мононитросоединения в настоящее время не применяют.

В последнее время широко начали применять тринитросоединение гетероциклического* ряда — гексоген.

---

* В молекулы гетероциклических соединений входит замкнутый цикл из разных атомов (углерод, азот и др.).

Таблица 18

Взрывчатые характеристики нитросоединений, имеющих различное количество заместителей в ядре

Наименование нитросоединений	Количество нитрогрупп	Общее количество заместителей	Взрывчатые характеристики				
			теплота взрыва, *ккал/кг*	скорость детонации, *м/сек*	расширение в свинцовой бомбе, *см³*	бризантность по обжатию медного цилиндра, *мм*	работа удара, вызывающего взрыв, *кг/см²*
Динитробензол	2	2	870	6100 (при плотности 1,5 *г/см³*)	250	2,9	19,5
Динитротолуол	2	3	—	—	—	—	18,9
Тринитробензол	3	3	1065	7000 (при плотности 1,63 *г/см³*)	330	4,1	12,1
Тринитротолуол	3	4	950	6700 (при плотности 1,55 *г/см³*)	285	3,6	11,4
Тринитрофенол	3	4	1000	7100 (при плотности 1,6 *г/см³*)	305	4,1	8,2
Тринитроксилол	3	5	—	—	—	—	5,7

СПОСОБ ВВЕДЕНИЯ НИТРОГРУПП В ОРГАНИЧЕСКИЕ СОЕДИНЕНИЯ

Процесс введения нитрогрупп в молекулу вещества называется нитрацией. В химии известно несколько способов нитрации органических веществ. Однако наибольшее производственное распространение получил способ нитрации путем воздействия на органическое вещество смеси азотной и серной кислот (нитрующей смеси).

Схематически в качестве примера можно привести реакцию нитрации бензола:

$$C_6H_6 + HNO_3 \rightarrow C_6H_5NO_2 + H_2O.$$

Скорость и полнота протекания реакции нитрации зависит от состава нитрующей кислотной смеси и температурного режима нитрации. При нитрации выделяется вода, которая снижает концентрацию азотной кислоты, являющейся источником нитрогрупп. Поло-

жительную роль серной кислоты объясняют тем, что она связывает воду и поддерживает нужную концентрацию азотной кислоты. Кроме того, в присутствии серной кислоты уменьшаются окислительные процессы, сопутствующие нитрации.

По современным представлениям в нитрующей серно-азотной смеси имеются ионы NO_2^+ и HSO_4^-. Ион NO_2^+ (называемый нитроний) является активным нитрующим агентом, а ион HSO_4^-—облегчает процесс замещения водорода молекулы органического вещества ионом NO_2^+.

Образование ионов NO_2^+ и HSO_4^- может быть представлено следующим уравнением:

$$HNO_3 + 2H_2SO_4 \rightleftarrows NO_2^+ + H_3O^+ + 2HSO_4^-$$

(ион H_3O^+ называют гидроксоний).

Тогда реакция нитрации протекает по уравнению:

$$RH + NO_2^+ + HSO_4^- \rightarrow RNO_2 + H_2SO_4.$$

Следовательно, чем выше концентрация ионов NO_2^+ и HSO_4^-, тем с большей скоростью и полнотой будет протекать реакция нитрации.

Для образования ионов необходимо, чтобы концентрация кислот находилась в определенных пределах. В крепкой серной кислоте ионов HSO_4^- мало. При некотором разбавлении серной кислоты водой количество ионов HSO_4^- увеличивается. Образование ионов HSO_4^- может быть представлено следующим образом:

$$H_2SO_4 + H_2O \rightleftarrows H_3O^+ + HSO_4^-.$$

Для нитрации каждого вещества находят наилучшее (оптимальное) содержание компонентов в нитрующей смеси.

В большинстве случаев введение трех нитрогрупп в молекулу органического вещества производят не сразу, а в две или три фазы. При этом практически всегда происходит образование не только моно- ди- или тринитросоединений, а и смеси их в соотношении, зависящем от режима нитрования.

В производстве в основном применяется такой режим работы, когда в определенное количество нитруемого вещества постепенно вводят нитрующую смесь. В последнее время все более широкое применение находит непрерывный процесс нитрации, при котором в аппараты одновременно и непрерывно поступают кислотная смесь и нитруемое вещество.

В начале периодического процесса нитрования реагирующую массу приходится несколько подогревать, поднимая температуру примерно на 2—5° в минуту. Но по мере протекания реакции выделяется такое количество тепла, что во избежание осмоления продукта и в целях безопасности, начиная с определенной для каждого вещества температуры, реакцию ведут при охлаждении реагирующей массы.

Процесс нитрации ведется в аппаратах, называемых нитраторами (рис. 52). Нитраторы изготавливают из чугуна, специальных сортов стали или других кислотоупорных материалов (например свинца).

Нитраторы имеют рубашку и змеевик для охлаждения или нагревания реагирующих веществ. Реакционную массу перемешивают механически при помощи мешалок или путем пропускания (барботирования) воздуха (последнее чаще применяется при производстве нитроглицерина). Нитраторы обязательно снабжают термометрами для постоянного наблюдения за температурой реакционной массы.

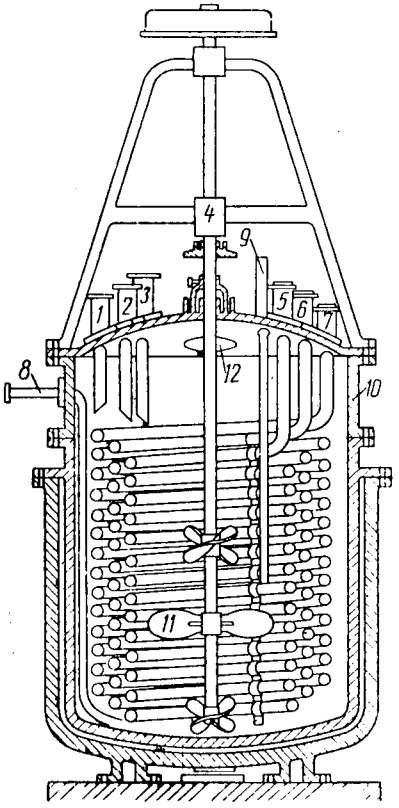


Рис. 52. Нитратор: *1, 2, 3* — штуцеры для подачи материалов; *4* — подшипник; *5, 6, 7* — отводы охлаждающей воды; *8*—переточный штуцер; *9*—термометр; *10*—чугунное кольцо; *11*—лопастная мешалка; *12*—люк

В последнее время в производстве ряда продуктов стали внедряться автоматические методы контроля температуры и состава реакционной массы в нитраторах.

ТРИНИТРОТОЛУОЛ (ТРОТИЛ)

Тринитротолуол или как его еще называют тротил или тол [$C_6H_2CH_3(NO_2)_3$] является одним из самых распространенных взрывчатых веществ класса химических соединений.

Тротил—твердое вещество с температурой плавления 80,2°, получаемый нитрованием толуола. Чистый перекристаллизованный из спирта тротил состоит из кристаллов ромбической формы, имеющих цвет от светло-желтого до темно-желтого. В порошкообразном виде тротил имеет гравиметрическую плотность около 0,9 *г/см*^{3} и хорошо прессуется. Его максимальная плотность, получающаяся при прессовании под давлением около 4000 *кг/см*^{2}, равна 1,60 *г/см*^{3}. Литой (плавленый) тротил имеет плотность около 1,54—1,59 *г/см*^{3}, а в расплавленном состоянии—1,467 *г/см*^{3}. Удельный вес тротила—1,663. Для производства аммиачно-селитренных ВВ (аммонитов) часто применяют сырой (некристаллизованный) тротил. Сырым его называют потому, что после нитрации тротил специально не очищают, а лишь промывают водой от кислот. Такой продукт, имеющий температуру плавления около 76°, содержит некоторое количество примесей, состоящих из недонитрованных до тринитротолуола промежуточных веществ и изомеров тротила. Эти примеси обусловливают маслянистость тротила.

Тротил практически не растворим в воде — при 20° в 100 *мл* воды

растворяется только 0,013 *г*. В некоторых органических жидкостях, например, в толуоле и ацетоне, он растворяется легко. Растворимость тротила в органических растворителях увеличивается с повышением температуры; этим иногда пользуются для его очистки.

Тротил имеет высокую химическую стойкость и в чистом виде при обычной температуре не способен к саморазложению и самовозгоранию. При соприкосновении тротила с щелочами образуются соединения, называемые тротилатами. Тротилаты значительно более чувствительны к механическим воздействиям и нагреву, чем тротил. Взаимодействие щелочей с тротилом легко обнаружить по появлению ярко-красного окрашивания.

При воздействии света тротил с поверхности буреет. Образующееся бурое вещество, имеющее ту же формулу, что и тротил, растворимо в воде и плавится при температуре 260—280°. Чувствительность к удару у этого вещества значительно выше, чем у тротила. Температура вспышки тротила около 310°. Вспышка обычно не сопровождается взрывом. Переход горения тротила в детонацию наблюдается только при горении его в замкнутом пространстве или при горении очень больших количеств.

Чувствительность тротила к механическим воздействиям не велика. Практически его можно считать не чувствительным к трению. Чувствительность тротила к удару при стандартных испытаниях на копре характеризуется 4—12% взрывов. Заметной разницы в чувствительности к удару кристаллического тротила и тротила-сырца не наблюдается.

При использовании тротила на взрывных работах надо иметь в виду резкое возрастание его чувствительности к удару при попадании в него песка или подобных твердых примесей. В условиях заряжания взрывных камер всегда имеется опасность засорения тротила породой. Поэтому при обращении с тротилом запрещается применять металлический инструмент для проталкивания его в зарядную камеру, инструмент из черного металла для разбивания кусков и других операций с тротилом.

Восприимчивость тротила к инициированию зависит от его физического состояния. Наиболее восприимчив тротил в кристаллическом виде. Менее восприимчив прессованный и мало восприимчивы чешуйчатый и литой.

В практических условиях использования кристаллический и прессованный тротил инициируют капсюлем-детонатором № 8, а чешуйчатый и литой тротил взрывается только от промежуточного детонатора, в качестве которого можно применять тротил в порошкообразном или прессованном виде, либо один из аммонитов.

Взрывчатые свойства. Теплота взрыва тротила около 1000 *ккал/кг*. Объем газов, образующихся при взрыве, невелик и составляет около 700 *л/кг*.

Так как тротил имеет сильно отрицательный кислородный баланс, то не весь углерод, содержащийся в нем, окисляется во время взрывчатого превращения. При взрыве заряда тротила можно ясно

увидеть темное облако—дым, что указывает на содержание в продуктах взрывчатого превращения твердого углерода. Такая неполнота окисления обусловливает сравнительно низкую работоспособность тротила, которая при определении по стандартной пробе в свинцовой бомбе составляет 285 *см*³.

Бризантность мелкокристаллического тротила при плотности 1 *г/см*³ равна 16,5 *мм*, а при увеличении плотности до 1,4 *г/см*³ она возрастает настолько, что заряд тротила, применяемый для этой пробы, разбивает свинцовый столбик.

С увеличением плотности возрастает и скорость детонации. При плотности тротила 0,85 *г/см*³ его скорость детонации равна 4400 *м/сек*, при плотности 1,31 *г/см*³—5800 *м/сек*, при плотности 1,4 *г/см*³—6200 *м/сек*, а при плотности от 1,54 до 1,61 *г/см*³ скорость детонации тротила равна 6700—6800 *м/сек*.

В патронах диаметром 31 *мм* и весом 200 *г* при плотности около 1 *г/см*³ порошкообразный тротил способен передавать детонацию между патронами на расстояние 6—7 *см*.

Как и всякое взрывчатое вещество, тротил имеет свои критический и оптимальный диаметры. Критические диаметры порошкообразного тротила, в зависимости от величины частиц, при плотности 0,85 *г/см*³ находятся в пределах 5—11 *мм*.

На взрывных работах тротил применяют главным образом как составную часть аммонитов, а в чистом виде—для взрывов в воде и в обводненных забоях.

Следует иметь ввиду, что при взрыве больших зарядов (в шурфах, камерах) иногда наблюдается явление так называемых «вторичных взрывов», когда через некоторый промежуток времени (от нескольких секунд до десятка минут) после взрыва тротилового заряда получается в массе взорванной породы довольно сильный хлопок, который сопровождается иногда выбросом пламени. Сила вторичного взрыва незначительна, и разброса породы обычно не получается. Можно предполагать, что в этом случае происходит взрыв образовавшихся и достигших в смеси с воздухом взрывоопасной концентрации газов взрыва, содержащих окись углерода и другие горючие газы.

Изготовление тротила. Исходным продуктом при изготовлении тротила служит каменноугольный или нефтяной толуол. В процессе производства тротила используют аппараты периодического или непрерывного действия.

Производство тринитротолуола обычно состоит из нескольких стадий нитрации толуола. В каждой последующей стадии применяют более крепкую кислотную смесь, и процесс ведут при более высокой температуре. В результате этого число нитрогрупп в продукте увеличивается.

Полученный тринитротолуол отделяют от отработанной кислоты и промывают водой.

В зависимости от назначения тринитротолуола его промывают водой до определенного остаточного содержания кислоты. Если тротил предназначен для выпуска в некристаллизованном виде (сырой

тротил), то его промывают до содержания кислоты не выше 0,1%. Для получения кристаллического тротила (или в виде чешуек) его подвергают дальнейшей очистке.

Самым распространенным способом очистки тротила является очистка его раствором сульфита натрия ($Na_2SO_3 \cdot 7\,H_2O$), которая

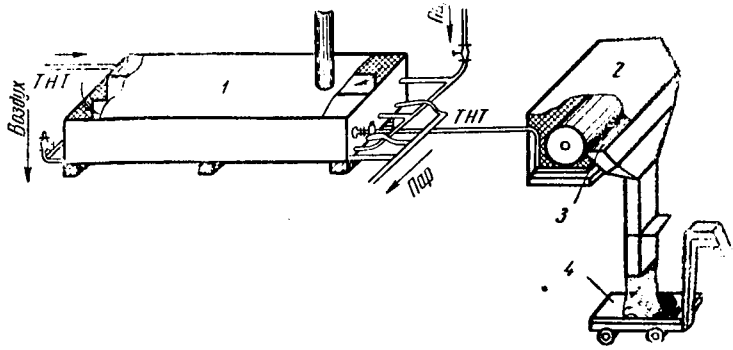


Рис. 53. Схема сушки и чешуирования тротила: *1* — сушильная ванна; *2* — барабан; *3* — бронзовый нож; *4* — весы

основана на том, что тротил и его примеси образуют с сульфитом химические соединения, имеющие различную растворимость в водной среде. Очищенный и вторично промытый тротил сушат в расплавленном состоянии при температуре 103—106°, отфильтровывают от случайных механических примесей, охлаждают воздухом до температуры 85° и передают на чешуирование.

Тротил в виде чешуек размером примерно 5×5×0,5 *мм* получают следующим образом (рис. 53). Расплавленный тротил направляют в ванну, в которую частично погружается вращающийся со скоростью 5—10 оборотов в минуту барабан, охлаждаемый изнутри водой. Барабан при вращении смачивается тротилом, застывающим на его поверхности. Затвердевший тротил срезают бронзовым ножом по всей длине барабана; полученный чешуйчатый тротил взвешивают и направляют на укупорку.

ПИКРИНОВАЯ КИСЛОТА (ТРИНИТРОФЕНОЛ)

Пикриновая кислота [$C_6H_2(NO_2)_3OH$] была открыта в 1788 г. Но только в конце XIX в. французский химик Тюрпен предложил применять прессованную пикриновую кислоту для снаряжения артиллерийских снарядов.

После открытия тротила применение пикриновой кислоты значительно сократилось, так как производство ее сложнее производства тротила, а в обращении она более опасна. Иногда пикриновую кислоту все же используют на взрывных работах.

Пикриновая кислота по внешнему виду представляет собой пластинчатые кристаллы желтого или светло-желтого цвета. Температура плавления ее 122,5°. Насыпная плотность около 1 *г/см*^{3}, удельный вес 1,813. Для снаряжения боеприпасов обычно применяют прессованную пикриновую кислоту плотностью 1.63 *г/см*^{3}.

Химические свойства. В нормальных условиях хранения пикриновая кислота химически стойка и не способна к саморазложению и самовозгоранию. Так как она обладает кислотными свойствами (благодаря наличию в молекуле гид-

роксильной группы OH), то ее способность к химическим превращениям значительно выше, чем, например, у нейтрального тринитротолуола. В сухом виде она не реагирует с металлами, но в присутствии влаги и особенно при повышенной температуре пикриновая кислота взаимодействует с металлами, образуя так называемые пикраты, т. е. соединения, в которых водород фенольной группы замещен металлом. Наиболее легко образуются пикраты цинка, железа и меди.

Пикраты опасны в обращении, так как чувствительны к механическим воздействиям, нагреву и огню. Пикрат свинца близок к пироксилину по чувствительности к удару и взрывается при падении груза весом 2 *кг* с высоты 10 *см*, а пикрат окисного железа, высушенный при температуре 100°, близок по чувствительности к тетрилу. Большинство пикратов при нормальных условиях содержат в своей молекуле кристаллизационную воду, которая снижает их чувствительность к механическим воздействиям. Однако при нагревании пикратов вода теряется и опасность при обращении с ними возрастает.

При смешивании пикриновой кислоты с аммиачной селитрой вследствие выделения свободной азотной кислоты наблюдались случаи разогрева смеси и даже ее вспышек. Поэтому смешивание пикриновой кислоты с аммиачной селитрой или совместное их хранение не допускается.

Промышленное применение имел образующийся при взаимодействии аммиака с пикриновой кислотой пикрат аммония, который использовали в некоторых странах для снаряжения бронебойных снарядов. Чувствительность его ниже чувствительности тротила. Температура вспышки 320°.

Температура вспышки пикриновой кислоты находится в пределах 300—310°. Небольшие количества пикриновой кислоты сгорают на воздухе без взрыва, но горение больших ее количеств может закончиться взрывом.

Чувствительность пикриновой кислоты к удару характеризуется примерно 32% взрывов. При наличии 0,5% песка в пикриновой кислоте она дает 100% взрывов.

В порошкообразном состоянии пикриновая кислота взрывается капсюлем-детонатором № 8, а для взрыва литой пикриновой кислоты требуется промежуточный детонатор.

Взрывчатые характеристики. Бризантность пикриновой кислоты при насыпной плотности (около 1 *г/см*^{3}) равна 16—17 *мм*. Вода значительно флегматизирует пикриновую кислоту и при содержании 16% влаги обжатие свинцового цилиндрика составляет всего 6 *мм*. Работоспособность пикриновой кислоты при испытании в свинцовой бомбе равна 305 *см*^{3}. Скорость детонации в стальных трубах при плотности 1,5 *г/см*^{3} равна примерно 6700 *м/сек*, а при плотности 1,74 *г/см*^{3}—7500 *м/сек*.

ТЕТРИЛ (ТРИНИТРОФЕНИЛМЕТИЛНИТРАМИН)

Химически чистый тетрил $[C_6H_2(NO_2)_3N\begin{matrix}CH_3\\ \diagup\\ \diagdown\\ NO_2\end{matrix}]$ представляет собой белые кристаллы, а термический перекристаллизованный—кристаллы светло-желтого или желтого цвета. Температура плавления тетрила 128,6—128,7°. Удельный вес тетрила 1,725, насыпная плотность около 1 *г/см*^{3}, а плотность, достигаемая прессованием, равна 1,68 *г/см*^{3}. Так как при температуре плавления тетрил уже заметно разлагается, то в литом виде его не применяют.

Тетрил, как и большинство нитросоединений, хорошо растворим в органических растворителях, например в бензоле, толуоле, ацетоне и др., и очень мало растворим в воде. При температуре 15° в 100 *г* воды растворяется 0,007 *г* тетрила, а при 100°—0,16 *г*.

Химическая стойкость неперекристаллизованного тетрила низкая. При нагревании до 60° уже наблюдается выделение окислов азота. Перекристаллизованный из органических растворителей тетрил обладает сравнительно высокой химической стойкостью.

Тетрил способен довольно энергично взаимодействовать с аммиачной селитрой, выделяя тепло. Смесь тетрила с аммиачной селитрой способна к самовоспламенению, и поэтому приготовление и применение таких смесей категорически запрещается. Температура вспышки тетрила 190—194°. При горении даже в сравнительно небольших количествах тетрил способен взрываться.

Чувствительность тетрила к удару характеризуется 50 — 60% взрывов при падении груза 10 *кг* с высоты 25 *см*. Примесь даже 0,05% песка резко повышает чувствительность тетрила к удару и трению.

Восприимчивость тетрила к взрыву других ВВ можно характеризовать величиной предельного заряда инициирующих взрывчатых веществ, которая для гремучей ртути равна 0,29 *г*, а для азида свинца—0,025 *г*. При плотности 1,68 *г/см*^{3} тетрил детонирует от взрыва 0,54 *г* гремучей ртути.

По взрывчатым характеристикам тетрил превосходит тротил и пикриновую кислоту. Теплота взрывчатого разложения его равна примерно 1090 *ккал/кг*, а объем газообразных продуктов—710 *л/кг*. Бризантность тетрила при плотности 1 *г/см*^{3} равна 19 *мм*, а работоспособность, определенная в свинцовой бомбе, 340 *см*^{3}.

Скорость детонации тетрила при плотности 1,63 *г/см*^{3} (при которой он часто применяется в изделиях) равна 7200 *м/сек*.

Тетрил применяют в основном для снаряжения детонаторов и капсюлей-детонаторов.

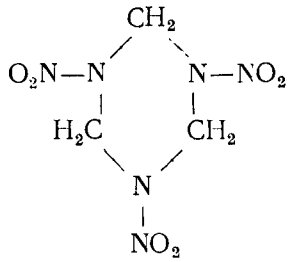
На открытых взрывных работах тетрил в виде шашек иногда применяют в качестве промежуточных детонаторов для инициирования маловосприимчивых взрывчатых веществ.

Ввиду того, что чувствительность тетрила к механическим и тепловым воздействиям сравнительно высокая, то обращаться с ним нужно крайне осторожно. Особенно следует опасаться засорения тетрила песком или другими подобными посторонними примесями.

Изготовление тетрила. Исходным сырьем для получения тетрила служит диметиланилин [$C_6H_5N(CH_3)_2$]. Во избежание сильного окисления и вспышки диметиланилина при воздействии на него азотной кислоты его перед нитрацией обрабатывают серной кислотой и получают диметиланилинсульфат. Этот продукт более стоек к процессам окисления и реакция нитрации проходит в одну стадию (при температуре 40—50°). Полученный тетрил отделяют от отработанных кислот, а затем хорошо отмывают водой и отжимают на центрифуге. Промытый и отжатый тетрил растворяют в ацетоне или бензоле, фильтруют и выкристаллизовывают в виде мелкого порошка, который отжимают на вакуумворонке, промывают спиртом и сушат при температуре 55—60°.

ГЕКСОГЕН

Гексоген (циклотриметилентринитрамин), имеющий формулу $C_3H_6N_6O_6$ или



сравнительно новое взрывчатое вещество, получившее производственное значение лишь в 20 годах XX века.

До недавнего времени гексоген применяли в основном для снаряжения боеприпасов. Однако в последнее время его используют в качестве компонента мощных промышленных взрывчатых веществ и вторичного заряда (вместо тетрила)для капсюлей-детонаторов. Одно время гексоген применяли для снаряжения детонирующего шнура.

Гексоген представляет собой белые кристаллы, без запаха и вкуса. Удельный вес гексогена 1,82, насыпная плотность около 1 *г/см*^{3}. Температура плавления 203,5°. Растворимость гексогена в воде ничтожно мала. В 100 *г* воды при 20° растворяется 0,01 *г* гексогена, а при 100°—0,15 *г*. Гексоген плохо растворяется и в органических растворителях .

Химическая стойкость гексогена высокая. Наблюдения за стойкостью гексогена в течение месяца хранения его при температуре 50° не показали никаких признаков разложения. Заметное разложение гексогена начинается при температуре 200°.

Температура вспышки гексогена 215°. Зажженный в небольшом количестве гексоген сгорает обычно, шипя и плавясь, но без взрыва.

Чувствительность гексогена к удару характеризуется 80—90% взрывов при падении груза 10 *кг* с высоты 25 *см*. Ввиду высокой чувствительности гексогена к механическим воздействиям его применяют для снаряжения в флегматизированном виде. В качестве флегматизатора применяют парафин или церезин.

Восприимчивость гексогена к взрыву другого вещества высокая. При любых плотностях детонация его может быть вызвана взрывом капсюля-детонатора.

Взрывчатые характеристики. Работоспособность гексогена, определенная в свинцовой бомбе, равна 475 *см*^{3}. Бризантность по стандартной пробе определить не удается, так как при взрыве навески 50 *г* свинцовый столбик разбивается. При взрыве навески 25 *г* обжатие свинцового столбика составляет 16 *мм*.

Скорость детонации при плотности 1,7 *г/см*^{3} равняется примерно 8600 *м/сек*.

Теплота разложения гексогена 1290 *ккал/кг* (при парообразной воде).

Получают гексоген обычно из уротропина. В отличие от других нитросоединений уротропин нитруют не смесью азотной и серной кислот, а чистой крепкой (лучше 95—100-процентной) азотной кислотой. Это объясняется тем, что серная кислота разлагает уротропин и гексоген.

После промывки гексоген перекристаллизовывают из ацетона.

ДИНИТРОНАФТАЛИН

Из нитропроизводных нафталина в производстве промышленных взрывчатых веществ в настоящее время имеет значение только динитронафталин $C_{10}H_8(NO_2)_2$. Динитронафталин применяется в качестве составной части динафталита, в состав которого входит также аммиачная селитра. В качестве самостоятельного взрывчатого вещества динитронафталин не применяют.

По внешнему виду динитронафталин представляет собой однородный порошок или гранулы серо-желтого цвета. Динитронафталин отличается весьма малой чувствительностью к механическим воздействиям и малой восприимчивостью к взрыву других ВВ. Взорвать его можно лишь в крупных зарядах с помощью больших промежуточных детонаторов.

Динитронафталин получают нитрацией нафталина, являющегося продуктом переработки каменного угля. Нитрацию ведут в две фазы смесью серной и азотной кислот. Нитрованный продукт тщательно промывают до остаточного содержания кислоты (по серной кислоте) в первом и втором сорте не выше 0,1%, а в третьем сорте не выше 0,2%.

Влажность готового динитронафталина не должна превышать 0,5%.

ГЛАВА XV

АММИАЧНО-СЕЛИТРЕННЫЕ ВЗРЫВЧАТЫЕ ВЕЩЕСТВА

АММИАЧНАЯ СЕЛИТРА И ЕЕ СВОЙСТВА

Азотнокислый аммоний NH_4NO_3 (нитрат аммония), обычно называемый аммиачной селитрой, является основным компонентом обширного класса промышленных взрывчатых веществ — аммонитов.

Аммиачная селитра была впервые изготовлена Глаубером в 1658 г. и описана под названием «пламенный нитрат».

По внешнему виду селитра представляет собой белое или слегка желтое кристаллическое вещество. Удельный вес, в зависимости от формы и структуры кристаллов (модификации), колеблется в пределах 1,56—1,74.

Аммиачную селитру получают взаимодействием аммиака и азотной кислоты:

$$NH_3 + HNO_3 = NH_4NO_3.$$

Аммиачную селитру выпускают в виде чешуек, гранул или кристаллов. Безводная аммиачная селитра плавится при температуре 169,1°. При наличии влаги температура плавления селитры значительно снижается.

Аммиачная селитра может существовать в нескольких кристаллических модификациях, каждая из которых устойчива в определенном интервале температур. При нагревании или охлаждении селитра может переходить из одной модификации в другую.

Полиморфные превращения аммиачной селитры влекут за собой изменение плотности кристаллов и выделение или поглощение тепла.

Стабильные модификации при нормальном давлении соответствуют интервалам температур: ниже минус 16—18°, от минус 16—18 до +32,3°, от +32,3 до +85,1°, от +85,1 до 125,6° и от 125,6 до +169,1°.

Насыпная плотность аммиачной селитры в зависимости от способа и условий кристаллизации находится в пределах 0,86—0,97 *г/см*^{3}.

В процессе хранения аммиачной селитры в условиях частого и резкого перепада температур иногда можно наблюдать сильное увеличение ее объема. Это явление особенно заметно при значительной влажности селитры. Совершенно сухая аммиачная селитра даже при резких колебаниях температуры сохраняет свой первоначальный объем.

Аммиачная селитра хорошо растворяется в воде (табл. 19).

Таблица 19

Растворимость аммиачной селитры в воде при различной температуре

Температура, град.	Содержание селитры в насыщенном растворе, %	Температура, град.	Содержание селитры в насыщенном растворе, %
0	54,49	90	88,53
10	59,96	100	90,86
20	65,18	110	93,01
30	70,00	120	94,97
40	73,70	130	96,61
50	77,21	140	97,59
60	80,42	150	98,47
70	83,35	160	99,33
80	87,34	169,1	100,00

Растворение селитры в воде происходит со значительным поглощением тепла. При растворении 6 частей селитры в 10 частях воды температура понижается приблизительно на 27°. Температура замерзания воды значительно понижается, если растворить в ней ам-

миачную селитру. Раствор, содержащий 50 *г* селитры на 100 *г* воды, замерзает при температуре около —13°.

Аммиачная селитра не взаимодействует с алюминием и железом, и эти металлы могут служить материалом для изготовления различного оборудования, применяемого в производстве селитры. Расплавленная аммиачная селитра реагирует со многими металлами, в том числе со свинцом, никелем и цинком. Особенно активно действует селитра на кадмий и медь. При взаимодействии аммиачной селитры с этими металлами образуется нитрит аммония—неустойчивое вещество, увеличивающее взрывоопасность селитры. Поэтому не следует допускать попадания этих металлов в аммиачную селитру и длительное хранение ее в оцинкованных емкостях.

Пропитанные селитрой и затем высушенные бумага и ткани горят значительно интенсивнее, чем непропитанные.

Аммиачную селитру следует хранить в сухом огнестойком помещении, обязательно вдали от горючих легкоокисляемых материалов. Мешки с аммиачной селитрой нужно укладывать так, чтобы в пространство между ними мог свободно проникать свежий воздух.

В случае возникновения пожара в складе аммиачной селитры, тушить его следует водой, которая не только снижает температуру, но и легко растворяет соль.

Гигроскопичность. Аммиачная селитра отличается высокой гигроскопичностью. Гигроскопическая точка, выражаемая в процентах относительной влажности, составляет при 10° — 75,3, при 25°—62,7, а при 50° — 48,4. Наличие в аммиачной селитре примесей других растворимых в воде веществ обычно ведет к снижению гигроскопической точки. Исключение составляют лишь такие примеси, которые образуют двойные соли. Например, двойная соль $NH_4NO_3 \cdot (NH_4)_2SO_4$ менее гигроскопична, чем чистая аммиачная селитра.

Аммиачная селитра, будучи обработана некоторыми продуктами переработки нефти, первое время увлажняется несколько медленнее по сравнению с чистой селитрой, но затем скорость увлажнения этих образцов выравнивается.

Скорость увлажнения аммиачной селитры, как правило, не зависит от наличия в ней нерастворимых примесей и степени ее измельчения. Она зависит в основном от температуры (при одинаковой относительной влажности воздуха), так как с повышением температуры снижается гигроскопическая точка и возрастает скорость диффузионных процессов в воздухе и в растворе.

Если принять скорость поглощения влаги поверхностью кристаллической аммиачной селитры при 25° за единицу, то при 40° скорость увлажнения в тех же условиях возрастет более чем в три раза.

В местах хранения аммиачной селитры и аммиачно-селитренных ВВ следует систематически вести наблюдения за температурой и влажностью воздуха. Для контроля влажности воздуха служат приборы, называемые психрометрами. Чаще всего применяют прибор, состоящий из двух термометров, шарик одного из которых постоянно смочен водой. Зная показания сухого и влажного термомет-

ров, с помощью номограммы (рис. 54) можно не только определить существующую в данный момент относительную влажность воздуха, но также быстро узнать сохнет или увлажняется аммиачная селитра.

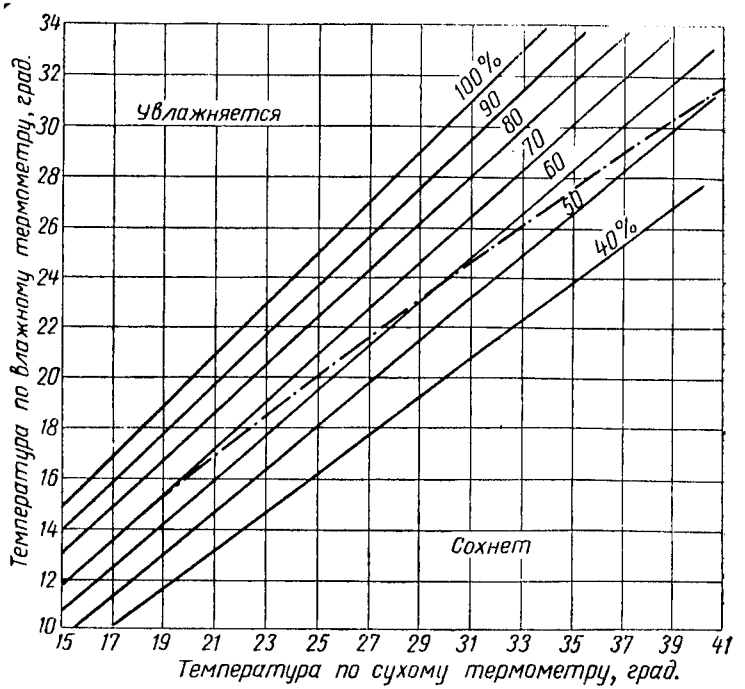


Рис. 54. Номограмма для определения относительной влажности воздуха по показаниям сухого и влажного термометров. Штрих-пунктиром показана кривая гигроскопических точек аммиачной селитры, разделяющая области сушки и увлажнения селитры

Слеживаемость аммиачной селитры создает значительные трудности при обработке ее в процессе изготовления ВВ. С целью уменьшения слеживаемости аммиачную селитру стремятся выпускать в виде крупных кристаллов или гранул. Однако следует иметь в виду, что гранулированную селитру значительно труднее измельчить, чем кристаллическую.

Термические свойства аммиачной селитры. При комнатной температуре аммиачная селитра сохраняется годами без заметных химических изменений.

При нагревании до 150° наблюдается частичное разложение аммиачной селитры на аммиак и азотную кислоту с поглощением тепла:

$$NH_4NO_3 \rightleftarrows NH_3 + HNO_3.$$

Эта реакция, по-видимому, сопутствует и другим реакциям, идущим при повышенной температуре.

При температуре около 200° становится заметной реакция разложения селитры с образованием закиси азота:

$$NH_4NO_3 \rightarrow N_2O + 2H_2O.$$

Реакция идет с выделением тепла, причем скорость ее возрастает с повышением температуры. При 260—290° реакция протекает очень быстро. В этом случае в продуктах разложения обнаруживается значительное количество окиси азота.

Разложение селитры возможно и с образованием азотной кислоты:

$$5NH_4NO_3 \rightarrow 2HNO_3 + 4N_2 + 9H_2O.$$

Предполагают, что образование азотной кислоты в процессе хранения и транспортирования горячей (выше 60°) аммиачной селитры является причиной самовозгорания бумажных мешков, в которые ее упаковывают. Добавки, способствующие разрушению азотной кислоты (мочевина, дифениламин), увеличивая термическую стойкость смеси аммиачной селитры с горючими веществами (древесная мука, крахмал, бумага и др.), уменьшают самовозгорание таких смесей.

На термическую стойкость аммиачной селитры оказывают влияние и многие неорганические примеси. Так, вещества, повышающие содержание свободной кислоты в селитре, способствуют ее термическому распаду. Щелочные добавки на 50—60° повышают температуру начала термического разложения селитры.

Некоторые добавки (например углекислый кальций), повышающие температуру начала термического разложения, могут способствовать внезапному возникновению вспышки аммиачной селитры при ее нагревании.

Температуру вспышки чистой аммиачной селитры по принятой для взрывчатых веществ методике, определить не удается, так как селитра в этих условиях разлагается без характерного для вспышек образования пламени.

Чистую аммиачную селитру не удается поджечь в закрытой стальной трубке даже таким мощным источником тепла, как горящий термит. Однако известны случаи возникновения пожаров и даже взрывов аммиачной селитры при перевозке ее в трюмах пароходов.

Взрывчатые свойства. При рассмотрении химических реакций разложения аммиачной селитры в качестве реакции взрывчатого разложения чаще всего приводят одно из уравнений Бертло:

$$2NH_4NO_3 \rightarrow 2N_2 + O_2 + 4H_2O.$$

Считают, что эта реакция должна идти при возбуждении взрыва аммиачной селитры взрывом ВВ или даже под действием интенсивного нагревания и сопровождаться довольно значительным выделением тепла.

Однако практически обнаружить кислород в продуктах взрыва аммиачной селитры почти не удается. Даже смешанная с большим количеством нитроглицерина аммиачная селитра при взрыве в бомбе Бихеля образует главным образом окислы азота.

Долгое время аммиачную селитру считали невзрывчатой, и при выгрузке из вагонов или из складов слежавшуюся аммиачную селитру иногда разрыхляли взрывным способом.

Катастрофические последствия применения такого способа разрыхления заставили в конце концов коренным образом пересмотреть взгляды на селитру, как на вещество, не способное к самораспространяющемуся взрывчатому превращению.

26 июля 1921 г. на верхнесилезской фабрике взрывчатых веществ в Кривальде произошел взрыв двух вагонов аммиачной селитры. Селитра была погружена в вагон навалом и основательно слежалась. Есть некоторые указания на то, что разрыхление перед разгрузкой производилось взрывным методом.

На месте взрыва образовалась воронка диаметром 20 *м* и глубиной 6—7 *м*. На расстоянии до 400 *м* были сорваны крыши с домов и выбиты стекла. Прилегающие к месту взрыва производственные строения были разрушены.

21 сентября 1921 г. в Оппау на Рейне на заводе аммиачно-селитренных удобрений произошел взрыв в помещении, где находилось 4500 *т* смеси аммиачной селитры с сульфатом аммония в соотношении 1 : 1. Разрыхление слежавшейся смеси производилось путем взрывания в шпуре 2—5 патронов ВВ. Одновременно взрывали до 25 шпуров. До катастрофы было сделано около 20 тыс. взрывов без каких-либо серьезных последствий. 21 сентября при очередной операции разрыхления произошел взрыв аммиачной селитры. Взрывом был почти полностью разрушен завод. На месте взрыва образовалась воронка шириной 96 *м*, длиной 169 *м* и глубиной 18,5 *м*.

В нашей стране аммиачную селитру одно время использовали в качестве самостоятельного взрывчатого вещества. Крупнейшие массовые взрывы при вскрытии карьеров были проведены Союзвзрывпромом с применением аммиачной селитры. Для лучшего обеспечения взрыва аммиачной селитры в качестве промежуточного детонатора применяли большие заряды аммонита, по весу близкие к заряду аммиачной селитры. Были попытки применить аммиачную селитру и для мелкошпурового способа ведения взрывных работ. Однако такое применение аммиачной селитры оказалось совершенно не эффективным.

Для возбуждения взрыва аммиачной селитры требуется мощный промежуточный детонатор.

Условием устойчивого распространения взрывчатого разложения аммиачной селитры является достаточно большой диаметр заряда. Критический диаметр для зарядов аммиачной селитры может быть различным, в зависимости от влажности, степени измельчения и плотности селитры. Детонация сухой тонкоизмельченной селитры при плотности около 0,8 *г/см*^{3} по данным А. Ф. Беляева может распространяться устойчиво в открытых зарядах диаметром около 10 *см*. Но взрывчатое превращение чешуйчатой селитры с влажностью около 1%, как показали опыты, затухает в заряде диаметром 30 *см*.

В настоящее время аммиачную селитру в чистом виде для взрывных целей не применяют ввиду низких взрывчатых свойств. По энергии взрывчатого превращения аммиачная селитра значительно уступает ВВ. Если теплота взрыва аммонитов колеблется в пределах 800—1200 *ккал/кг*, то энергия превращения аммиачной селитры даже по идеальному уравнению с выделением кислорода составляет всего 355 *ккал/кг*.

Вследствие малой чувствительности аммиачной селитры к механическому воздействию обращение с ней не требует такой осторожности, какую соблюдают при обращении с другими взрывчатыми веществами. Поэтому для измельчения ее успешно применяют стальные мельницы.

За границей и некоторое время в нашей стране для нужд сельского хозяйства выпускали аммиачную селитру, обработанную для уменьшения слеживаемости мазутом или вазелино- и воскообразными веществами. Даже небольшие добавки таких веществ существенным образом оказывают влияние на взрывчатые свойства аммиачной селитры.

Кислородный баланс аммиачной селитры положительный. Один грамм аммиачной селитры при разложении выделяет 0,2 *г* кислорода, обычно связанного с азотом в виде окислов, но способного окислить органические добавки, если они примешаны к селитре.

Это свойство аммиачной селитры и используют при применении ее в качестве компонента взрывчатых смесей. От многих других окислителей (калиевой или натровой селитры, хлората и перхлората калия и т. п.) аммиачная селитра выгодно отличается тем, что в продуктах ее разложения не содержится твердых веществ. Поэтому ВВ на ее основе являются более работоспособными, чем ВВ на основе окислителей, дающих при разложении твердый остаток (см. главу 10).

Примеси органических веществ, введенные даже в небольших количествах, значительно повышают энергию взрыва аммиачной селитры.

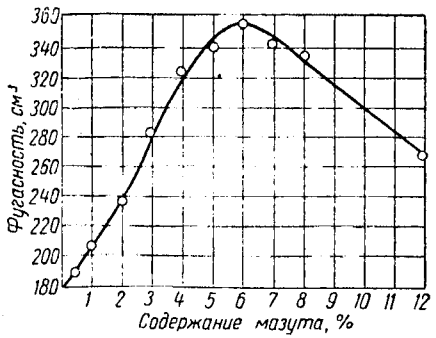


Рис. 55. Кривая фугасности смесей аммиачной селитры с мазутом

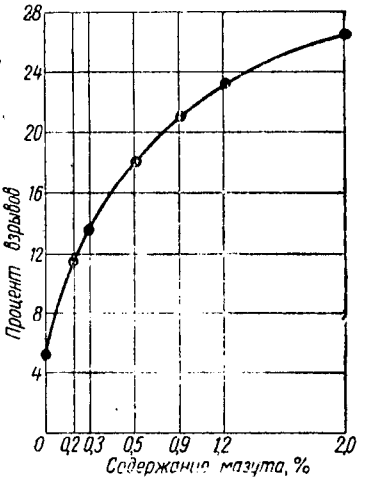


Рис. 56. Изменение чувствительности аммиачной селитры к удару при введении в нее мазута

График (рис. 55) показывает, как растет фугасность аммиачной селитры по мере увеличения содержания добавки мазута. С повышением содержания таких добавок (до 2%) увеличивается и чувствительность аммиачной селитры к удару (рис. 56).

Как известно, парафин и подобные ему вещества являются флегматизаторами для ВВ, имеющих обычно отрицательный или нулевой кислородный баланс, но по отношению к аммиачной селитре их скорее можно назвать сенсибилизаторами, так как, участвуя в реакции и повышая энергию взрыва, они одновременно повышают и восприимчивость селитры к детонации и чувствительность ее к удару.

Детонацию аммиачной селитры, обработанной мазутом (мазутированной), вызвать значительно легче, чем детонацию селитры, не содержащей органических примесей. Если для взрывания чистой или с примесями неорганических солей аммиачной селитры необходим промежуточный детонатор из 1—3 *кг* тротила или аммонита, то для взрыва мазутированной селитры, в зависимости от содержания в ней мазута, инертных негорючих примесей и влаги, а также от степени ее измельчения и слежалости, достаточен промежуточный детонатор из тех же ВВ в количестве от нескольких граммов до 0,5 *кг*. Сухая селитра без инертных примесей детонирует от капсюля-детонатора, если в ней содержится не меньше 0,5% мазута или парафина. Селитра, содержащая наряду с 0,5% мазута инертные примеси в количестве 3—5%, по чувствительности к капсюлю-детонатору близка к чистой аммиачной селитре. Однако промежуточный детонатор из 500 *г* тротила обеспечивает полный взрыв большого заряда такой селитры (рис. 57).

Детонация мазутированной аммиачной селитры протекает более устойчиво, чем детонация чистой селитры. Если критический диаметр чистой аммиачной

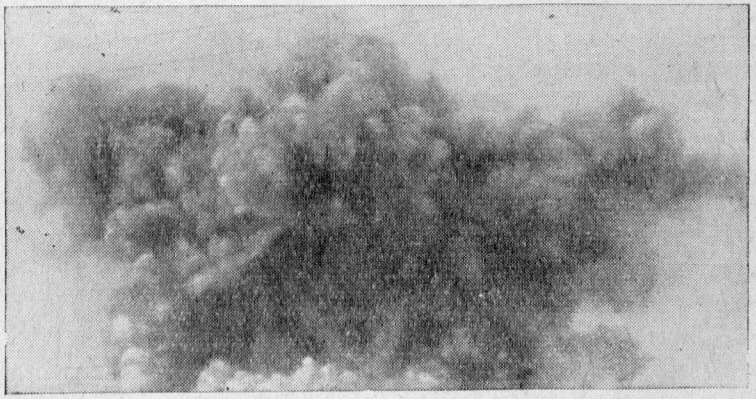


Рис. 57. Взрыв открытого заряда 1200 *кг* мазутированной аммиачной селитры, содержащей 0,5% мазута и инертную добавку, при инициировании 0,5 *кг* тротила

селитры не меньше 10 *см*, а чаще (в зависимости от состояния селитры) измеряется десятками сантиметров, то мазутированная селитра устойчиво детонирует в зарядах диаметром 3—6 *см* (см. рис. 21).

Скорость детонации селитры в зарядах диаметром около 30 *см* с повышением содержания мазута при приблизительно одинаковом гранулометрическом составе (селитра неизмельченная) возрастает следующим образом:

Содержание мазута, %	Скорость детонации, *м/сек*
0,0	1300—1400
0,5	1400—1700
1,0	1800—2200
3,0	2200—2600

Как видно из приведенных данных, аммиачная селитра, содержащая горючие компоненты в достаточно большом количестве, является типичным взрывчатым веществом.

ДИНАМОНЫ

Динамонами называются смеси аммиачной селитры с горючими веществами.

Широкого практического применения на взрывных работах динамоны не нашли, так как по своим взрывчатым свойствам они уступают другим промышленным ВВ.

В Советском Союзе промышленное изготовление динамонов в небольшом масштабе началось в 1936 г. Массовый же производственный выпуск динамонов был налажен в годы Великой Отечественной войны, когда в связи с огромным потреблением взрывчатых веществ для военных целей горная промышленность испытывала нужду в пригодных для взрывных работ и в то же время не очень дефицитных ВВ.

Известные и опробованные в производстве и применении динамоны разнообразны как по своему составу, так и по физико-химическим и взрывчатым свойствам.

Различие в составах динамонов объясняется многообразием применяемых горючих компонентов.

В качестве горючих компонентов динамонов применяют древесную муку, торф, сосновую кору, сосновые шишки, жмых, лигнин, древесный уголь, пек, парафин, алюминий, силикоалюминий, ферросилиций и т. п.

Наибольшее распространение у нас имели динамоны на торфе, древесной муке и на муке из сосновой коры.

Характеристики некоторых горючих невзрывчатых компонентов и их смесей с аммиачной селитрой, рассчитанных на нулевой кислородный баланс, приведены в табл. 20.

Таблица 20

Теплоты сгорания и кислородный баланс некоторых горючих веществ и расчетные теплоты взрыва динамонов на их основе

Наименование горючих веществ	Теплота сгорания 1 *г* при постоянном объеме, *ккал*	Кислородный баланс вещества (на 1 *г*)	Содержание горючего в динамоне при нулевом кислородном балансе, %	Теплота сгорания горючего, содержащегося в 1 *кг* динамона, *ккал*	Содержание аммиачной селитры в динамоне, %	Теплота разложения аммиачной селитры, содержащейся в 1 *кг* динамона, *ккал*	Теплота взрыва динамона, *ккал/кг*
Целлюлоза	4,185	—1,30	13,4	561	86,6	327	888
Древесная мука . .	4,690	—1,37	12,7	595	87,3	330	925
Торф . . .	5,100	—1,53	11,5	587	88,5	334	921
Лигнин . .	6,277	—1,91	9,5	595	90,5	342	937
Алюминий .	7,380	—0,89	18,6	1375	81,4	308	1683
Сажа . . .	7,810	—2,65	7,0	547	93,0	351	898
Парафин .	11,190	—3,46	5,5	615	94,5	357	972

Практически динамоны не всегда изготовляют с расчетом на нулевой баланс, так как в зависимости от свойств и дисперсности горючего лучшей детонационной способностью может обладать смесь, имеющая избыток или недостаток горючего по сравнению с составом, рассчитанным на нулевой кислородный баланс (см. главу 5).

Физико-химические свойства динамонов определяются свойствами компонентов, входящих в их состав.

Типичным свойством всех аммиачно-селитренных ВВ, в том числе и динамонов, является их **гигроскопичность.** Горючий компонент динамона, не изменяя гигроскопической точки селитры, может оказать некоторое влияние на скорость увлажнения состава. Замечено, что динамоны на торфе увлажняются медленнее, чем другие сорта динамонов или чистая аммиачная селитра. Добавка древесного угля ускоряет увлажнение динамонов.

Тонкодисперсные гидрофобные горючие компоненты динамонов придают им свойство несмачиваемости. Разработанный Союзвзрывпромом в годы Великой Отечественной войны водоустойчивый динамон на торфе с парафином явился первым водоустойчивым аммиачно-селитренным ВВ со специальной гидрофобной добавкой.

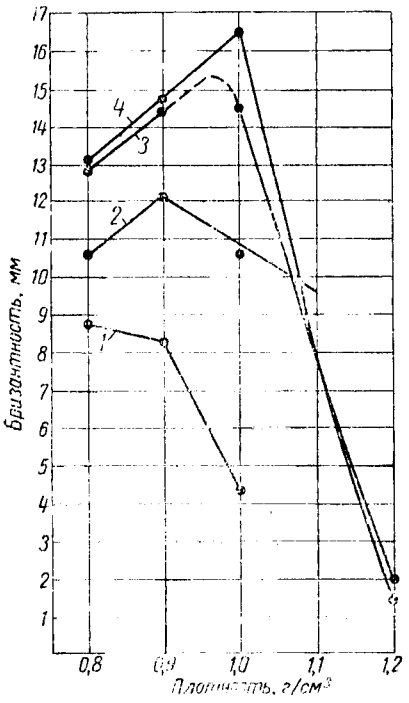


Рис. 58. Бризантность динамонов в зависимости от плотности: *1* — динамон У; *2* — динамон ДМ; *3* — динамон Т; *4* — динамон К

Со свойством гигроскопичности связано явление **слеживаемости** динамонов. Сильной слеживаемостью обладают динамоны с металлическими добавками или содержащие в качестве горючего компонента древесный уголь. Жидкие или пластичные компоненты, например керосин или парафин, во многих случаях не только не препятствуют слеживаемости, но иногда усиливают ее. Древесная мука, торф, измельченный мох являются добавками, заметно уменьшающими слеживаемость.

Плотность динамонов зависит от плотности и количества горючего компонента. Обычно она колеблется в пределах 0,8—1,0 *г/см*³. Все динамоны имеют сравнительно низкую критическую плотность, что является их существенным недостатком. Критическая плотность выше у динамонов, в органической добавке которых содержится больше летучих веществ, а также у тонкоизмельченных динамонов. Чем хуже обработан динамон, тем

ниже его критическая плотность. Практически превышение плотности выше 1,0—1,10 *г/см*³ для большинства динамонов недопустимо (рис. 58).

Некоторые сорта динамонов легко переуплотняются в процессе обращения с ними. Особенно склонны к переуплотнению динамоны с добавками металла (алюминия, силикоалюминия, ферросилиция). Переуплотнению благоприятствует повышенная влажность и наличие в составе динамона компонентов, уменьшающих его упругие свойства (смазывающие вещества—масла, парафин и др.).

В обращении динамоны относительно безопасны. Большинство из них по чувствительности к удару и трению не отличается от аммонитов.

Температура вспышки у различных сортов динамонов колеблется в пределах 280—320°. Однако в практике производства наблюдались случаи вспышек и загораний динамонов при значительно более низких температурах.

Некоторые составы на торфе и древесной муке давали воспламенение при 60—70°. Зарегистрированы также случаи загорания составов у выходного отверстия смесительного барабана непрерывного действия, в кожухах смесительных барабанов периодического действия и в осадочных камерах аспирационных устройств. Во всех перечисленных случаях температура динамона и поверхностей, с которыми он соприкасался, не превышала 60°, но время воздействия тепла было продолжительным. По-видимому, вспышки происходят в условиях, когда возможно местное накопление тепла, выделяющегося в результате реакций медленного окисления горючего.

Таблица 21

Взрывчатые свойства выпускавшихся промышленностью динамонов и аммонита № 2

Наименование показателя	Характеристики составов				
	Аммонит № 2 «Т» (аммиачной селитры 88%, тротила 12%)	Динамон «Т» (аммиачной селитры 88%, торфа 12%)	Динамон «СШ» (аммиачной селитры 85%, муки сосновых шишек 15%)	Динамон «К» (аммиачной селитры 85%, муки сосновой коры 15%)	Динамон «ДМ» (аммиачной селитры 85%, древесной муки 15%)
Бризантность, *мм*	8,5—12	13—16	16—17	11—14	10—13
Фугасность в свинцовой бомбе, *см*³	345	340	340	—	320
Скорость детонации, *м/сек* . .	3500	2900—3500	—	—	2800
Оптимальная плотность, *г/см*³ .	1,10	1,0—1,05	1,10—1,15	1,0	0,9
Передача детонации между патронами диаметром 32 *мм*, *см*	2—3	3—4	2—3	3—5	3—4

К лучу огня от огнепроводного шнура динамоны не чувствительны, но загорание динамонов от действия пламени наблюдалось. Пожары, возникавшие в процессе производства динамонов, не сопровождались взрывами.

При изготовлении динамонов необходимо следить за устранением пыления, так как известно, что взрывы горючих пылей в воздухе всегда имеют тяжелые последствия.

Взрывчатые свойства динамонов зависят от их состава и технологии изготовления.

По теплоте взрывчатого превращения (см. табл. 12) многие динамоны сходны с широко применяемыми сортами аммонитов. Из сравнения динамонов, выпускавшихся различными предприятиями во время войны, с используемым в то время аммонитом № 2, видно (табл. 21), что хорошо приготовленные динамоны почти не уступают по взрывчатым характеристикам этому аммониту. Однако динамоны не могут конкурировать с большинством современных аммиачно-селитренных ВВ.

АММОНИТЫ

Аммонитами называют аммиачно-селитренные ВВ, в состав которых входит одно или несколько взрывчатых нитросоединений.

Аммониты, содержащие в своем составе алюминий, называют аммоналами.

Почти во все аммониты в качестве взрывчатого нитросоединения входит тротил. Аммониты повышенной мощности, кроме тротила, могут содержать гексоген или тэн.

Бóльшую часть аммонитов выпускают в порошкообразном состоянии в патронах или в мешках, а отдельные сорта аммонитов— уплотненными в виде прессованных или шнекованных зарядов.

Химические свойства аммонитов. Химические свойства аммонитов определяются их составом. Для приготовления аммонитов в настоящее время используют только сравнительно химически стойкие и не вступающие между собой в активное взаимодействие компоненты. Даже сравнительно легко окисляющаяся алюминиевая пудра в смесях с аммиачной селитрой химически стойка, так как на ее поверхности образуется тончайшая пассивирующая пленка окиси, которая препятствует дальнейшему окислению алюминия. Только в сильно увлажненных составах можно наблюдать заметное окисление алюминия.

При длительном хранении аммонитов происходит покраснение поверхности частиц тротила, свидетельствующее о взаимодействии его с аммиаком, выделяющимся при диссоциации аммиачной селитры. Это взаимодействие не оказывает никакого влияния на взрывчатые свойства аммонитов, но несколько повышает их чувствительность к механическим воздействиям.

Таким образом, при нормальных условиях хранения и применения аммониты не способны к таким реакциям разложения и взаимодействия, которые могли бы существенно повысить опасность их применения или изменить взрывчатые свойства. Поэтому практически аммониты считают химически стойкими ВВ.

Отношение аммонитов к щелочам, металлам и другим химическим веществам тождественно отношению к этим веществам аммиачной селитры, являющейся основным компонентом аммонитов.

Соотношение компонентов в применяемых в настоящее время аммонитах подбирается таким образом, чтобы их кислородный баланс был равен нулю или близок к нулевому.

Физические свойства аммонитов. Физические свойства аммиачно-селитренных ВВ очень разнообразны и зависят как от их состава, так и технологии приготовления.

Основные физические свойства аммонитов определяются свойствами аммиачной селитры.

Гигроскопичность. Все аммониты гигроскопичны. Гигроскопичность их практически не отличается от гигроскопичности аммиачной селитры.

Гигроскопичность очень усложняет применение аммонитов. Увлажнившиеся в процессе перевозок и хранения аммониты обладают пониженной детонационной способностью. Кроме того, повышение влажности влечет за собой снижение критической плотности аммонитов и одновременно делает их более податливыми к уплотнению.

В связи с этим в шпурах или скважинах при заряжании увлажненных гигроскопичных составов часто получается такая плотность аммонитов, при которой они теряют способность к детонации и дают отказы или неполные взрывы.

В настоящее время единственным средством защиты аммонитов от увлажнения влагой воздуха служит оболочка патронов или упаковка аммонитов в материалы, предохраняющие их от доступа парообразной влаги. В качестве влагозащитных покрытий патронов применяют парафин, специальные мастики или полихлорвиниловый пластикат.

Парафиновое покрытие отличается значительной ломкостью. На поверхности патронов, покрытых парафином, даже при самых незначительных воздействиях, как, например нажатие на патрон пальцем при укладке их в ящики или заделке торцов, появляются трещины, открывающие влаге доступ к ВВ.

Рис. 59. Растрескивание парафинового покрытия на патронах после охлаждения их до —30°

При низких температурах парафиновое покрытие растрескивается и отслаивается от бумажной гильзы даже без всякого механического воздействия на патроны. Такое нарушение парафинового покрытия при —30° показано на рис. 59.

Специальные мастики (например, сплав парафина с петрола-

тумом) более эластичны, чем парафин, и поэтому лучше защищают ВВ от увлажнения. При сильном охлаждении они не растрескиваются и не отслаиваются от бумаги.

К наиболее надежным покрытиям следует отнести полихлорвиниловый пластикат, но применение его значительно удорожает патронированный аммонит, и поэтому его используют очень редко.

Водоустойчивость. До сравнительно недавнего времени внешняя изоляция патронов аммонитов служила также единственным средством защиты ВВ и от замокания при воздействии воды. Аммиачная селитра в смеси со взрывчатыми нитросоединениями и горючими добавками или добавками солей так же хорошо растворяется в воде, как и чистая селитра. В связи с этим аммониты всегда относились к категории неводоустойчивых ВВ.

Как уже указывалось в разделе о динамонах, в 1941—1942 годах было установлено, что составы, приготовленные на так называемой парафинированной аммиачной селитре и торфе, обладают некоторой водоустойчивостью. Патроны водоустойчивого динамона с успехом применяли в обводненных забоях, если пребывание их в воде было не длительным.

Позднее предложили вводить парафин и в состав аммонитов для придания им водоустойчивости. Промышленность стала выпускать такие составы, как аммонит № 8 ПВ, где индекс ПВ указывает, что в составе содержится парафин, являющийся гидрофобной добавкой, и аммонит обладает водоустойчивостью. Однако водоустойчивость таких составов была очень ограниченной, в сильной степени зависела от технологии изготовления аммонитов и не могла удовлетворить запросы горнодобывающей промышленности.

Дальнейшие исследования привели к созданию более совершенных водоустойчивых ВВ. Так было установлено, что хорошую водоустойчивость можно получить при совместном введении в состав аммонитов гидрофобных добавок двух типов—пленкообразующих и твердых мелкодисперсных веществ, гидрофобность которых усиливается наличием на частицах острых граней.

Хорошие результаты дает применение парафинистого мазута или парафина с природным мелкоизмельченным асфальтитом. На основе такой комбинированной гидрофобной добавки, общее количество которой в аммоните не превышает 1,5%, разработан и выпускается водоустойчивый аммонит В-3.

Высокая водоустойчивость аммонитов может быть получена и при совместном применении парафинистого мазута или парафина с некоторыми сортами сажи или канифоли.

Практическое применение в качестве гидрофобных добавок нашли также нерастворимые соли некоторых металлов жирных кислот, например стеарат кальция.

В последнее время разработан способ получения водоустойчивой аммиачной селитры путем образования железных солей жирных кислот в процессе кристаллизации селитры.

Производство водоустойчивых аммонитов на такой селитре удоб-

но, так как не требует каких-либо изменений в технологии приготовления аммонитов.

Однако некоторая кислотность водоустойчивой селитры вызывает нарушение прочности бумажных мешков, в которых она поступает на заводы, что приводит к излишним потерям селитры при перегрузках. Повышенная кислотность также делает ее непригодной для составов с нитроэфирами.

В настоящее время промышленностью широко осваивается изготовление аммонитов на основе водоустойчивой аммиачной селитры. Таким аммонитам присваивается индекс ЖВ.

Большое влияние на водоустойчивость аммонитов оказывает технология их приготовления. Чем лучше перемешаны компоненты аммонита, тем выше его водоустойчивость. При более тщательной технологии приготовления водоустойчивых аммонитов количество гидрофобных добавок может быть уменьшено. Это обстоятельство имеет важное значение, так как большинство гидрофобных добавок обладает флегматизирующими свойствами и количество их в составах аммонитов должно быть минимальным.

Вследствие незначительной смачиваемости и насыпной плотности меньше 1 *г/см*^{3} водоустойчивые порошкообразные аммониты не тонут в воде при свободной засыпке их в зарядные камеры, заполненные водой. Поэтому для заряжания таких скважин используют водоустойчивый аммонит в патронах с дополнительным грузом или в виде уплотненных шнекованных зарядов, которые имеют плотность около 1,3 *г/см*^{3} и легко тонут в воде.

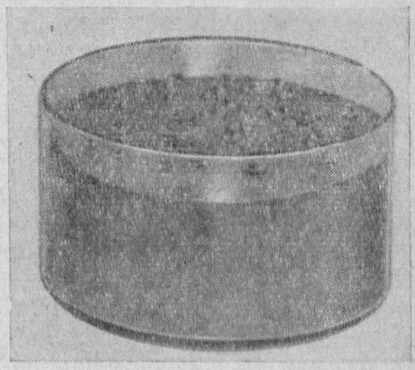


Рис. 60. Образование капель на поверхности водоустойчивого аммонита при его увлажнении

Водоустойчивые аммониты так же гигроскопичны, как и обычные, но отличаются от них тем, что поглощаемая влага не проникает в глубь заряда, а задерживается в виде капелек на их поверхности (рис. 60), проникая лишь в верхние слои состава в виде раствора аммиачной селитры. Основная же масса вещества остается практически сухой.

Слеживаемость аммонитов. Отрицательным свойством аммонитов является способность их слеживаться. В большинстве случаев слежавшийся аммонит не детонирует от капсюля-детонатора № 8. Детонационная способность слежавшегося аммонита может быть в значительной мере восстановлена его разрыхлением. Для этого патронированный аммонит перед употреблением разминают до восстановления порошкообразной структуры.

У слежавшегося аммонита, заряжаемого в скважины или рукава,

также следует восстановить порошкообразную структуру, так как при использовании слежавшегося аммонита (кусков) снижается плотность заряжания.

Для заряжания камер слежавшийся аммонит можно применять целыми мешками или отдельными кусками. Однако в этом случае обязательно должен быть применен промежуточный детонатор, которым может служить тот же аммонит, но в порошкообразном состоянии.

Менее склонны к слеживанию аммониты, содержащие в своем составе древесную муку.

Замечено, что составы с некоторыми органическими добавками, например с лигнином, обладают малой слеживаемостью. Но такие составы имеют другое отрицательное свойство. Они очень сильно пылят, затрудняя работу с ними как на заводах, где приготовляют аммониты, так и на местах применения. В некоторых странах для уменьшения слеживаемости в состав ВВ вводят красители типа фуксина.

Плотность аммонитов. Насыпная плотность аммонитов находится в пределах 0,8—1,0 *г/см*^{3}.

В патронах аммониты выпускают с плотностью 1,00—1,15 *г/см*^{3}. Для того, чтобы плотность заряжания шпуров аммонитами была близкой к плотности патронов ВВ, оболочку патронов перед заряжанием разрезают и патроны в шпуре раздавливают забойником. В этом случае ВВ занимает почти весь объем заряжаемой части шпура, и плотность заряжания становится близкой к 1 *г/см*^{3}.

Некоторые сорта аммонитов применяют прессованными с плотностью 1,5 *г/см*^{3}.

Критическая плотность большинства аммонитов, определяемая по стандартной пробе на бризантность, колеблется в пределах 1,15—1,4 *г/см*^{3}. Аммониты, содержащие мощные ВВ, имеют критическую плотность около 1,6 *г/см*^{3}.

Критическую плотность аммонитов можно повысить путем более тщательного приготовления их. Особенно благоприятно влияют на повышение критической плотности аммонитов улучшение сушки селитры и увеличение времени обработки компонентов в шаровых мельницах. Однако такое изменение технологического режима снижает производительность оборудования и удорожает производство аммонитов. Поэтому более тщательная технологическая обработка применяется только для аммонитов, выпускаемых в изделиях небольшого диаметра и повышенной плотности, например для прессованного аммонита № 6, критическая плотность которого находится в пределах 1,35—1,45 *г/см*^{3}. Для изделий, выпускаемых с повышенной плотностью, но большого диаметра (например, шнекованные заряды из аммонита В-3), может быть использован порошок, приготовленный по обычному технологическому режиму.

Снижение критической плотности аммонитов происходит при перекристаллизации аммиачной селитры и модификационных переходах за счет нарушения однородности состава и увеличения размеров частиц селитры.

При ведении взрывных работ нельзя допускать излишнего уплотнения ВВ, которое может повлечь за собой отказ. В то же время желательно использовать составы при максимально допустимых плотностях, которым соответствуют более высокие взрывчатые характеристики.

Повышение плотности аммонитов достигается прессованием или шнекованием составов. Прессованные и шнекованные заряды обладают жесткостью и не изменяют своей формы в процессе заряжания. Это ухудшает условия их использования, так как между зарядом и стенками шпура или скважины образуется зазор, наличие которого отрицательно влияет на плотность заряжания и на дробление взрываемой породы.

Наиболее распространенные заряды диаметром 32—36 *мм* целесообразно применять в прессованном виде в том случае, если их плотность выше 1,4 *г/см*^{3}. Тогда плотность ВВ компенсирует снижение плотности заряжания жестких патронов и создается возможность повысить эффективность действия заряда.

Шнекованные заряды из водоустойчивого аммонита В-3 диаметром 150—310 *мм* и с плотностью около 1,3 *г/см*^{3} целесообразно применять в обводненных скважинах. Такие заряды хорошо тонут в воде. Кроме того, в обводненных скважинах зазор между ВВ и стенками скважин заполняется водой, что благоприятно влияет на эффект взрыва. Шнекованные заряды в сухих скважинах не дают никакого преимущества перед зарядами из порошкообразного аммонита, заряжаемого россыпью.

Применяя шнекованные и прессованные заряды, необходимо иметь в виду, что в неблагоприятных условиях хранения, например, при изменении температуры и влажности окружающего воздуха, первоначальная плотность зарядов может изменяться и при этом прочность зарядов снижается. Наблюдались случаи снижения плотности зарядов от 1,3 до 0,75 *г/см*^{3}.

Чувствительность и восприимчивость аммонитов. Аммониты считаются сравнительно безопасными в обращении. Однако в связи с разнообразием рецептур и свойств аммонитов, чувствительность и, следовательно, безопасность их в обращении может колебаться в довольно широких пределах.

Чувствительность аммонитов к тепловому импульсу зависит главным образом от их состава. Аммониты, содержащие горючие добавки, более чувствительны к нагреву и огню, чем аммониты, содержащие только селитру, тротил и некоторые специальные неорганические добавки.

Температура вспышки аммонитов находится в пределах 280—350°. От луча огня огнепроводного шнура они не загораются. Зажженные более мощными средствами зажигания аммониты на открытом воздухе сгорают без взрывов. В замкнутом пространстве или при очень больших количествах аммонитов, сосредоточенных в одном месте, возможен переход горения во взрыв.

Чувствительность к удару аммонитов, не содержащих высокомощных нитросоединений, колеблется в пределах 16—32% взрывов.

Практика применения аммонитов подтверждает необходимость осторожного обращения с ними. Сильные удары, применение инструмента из черного металла, пробивание металлическим инструментом застрявших в шпурах или скважинах зарядов аммонитов неоднократно приводили к взрывам. Чувствительность к удару скального аммонита, содержащего мощное нитросоединение, характеризуется 32—50% взрывов. Обращение с таким аммонитом требует еще большей осторожности.

К трению все аммониты, если они не загрязнены посторонними твердыми примесями, мало чувствительны.

Восприимчивость всех стандартных аммонитов достаточно высокая и они надежно детонируют от капсюля-детонатора № 8. Увлажненные и слежавшиеся, а также переуплотненные аммониты обладают пониженной восприимчивостью, и в случае их использования без переработки иногда приходится применять промежуточный детонатор.

КЛАССИФИКАЦИЯ АММОНИТОВ

Чаще всего аммониты классифицируют на несколько больших групп по условиям безопасного применения. Кроме того, внутри отдельных групп аммониты подразделяют по некоторым физическим свойствам и мощности.

По условиям безопасного применения аммониты классифицируют следующим образом.

I. Аммониты для открытых работ. К аммонитам этой группы предъявляют требования только в отношении устойчивой детонационной способности, достаточной мощности и безопасности в обращении.

II. Аммониты для подземных работ, кроме шахт, опасных по газу и пыли. К этой группе относят те аммониты, в продуктах взрыва которых ядовитых газов содержится не больше, чем у аммонита, принятого в качестве эталона.

III. Аммониты для шахт, опасных по газу и пыли. Аммониты, входящие в эту группу, не должны вызывать взрыв метана или угольной пыли в опытном штреке при стандартных условиях испытания. Эти аммониты называют также предохранительными.

В группе ВВ для шахт, опасных по газу и пыли, в зависимости от степени предохранительных свойств и мощности составов, различают аммониты, допущенные для взрывания по углю и по породам.

Такая классификация аммонитов условна, так как для открытых работ могут быть использованы ВВ всех групп, а для подземных работ ВВ II и III групп, если применение их будет признано эффективным и экономически целесообразным.

По физическим характеристикам аммониты обычно разделяют на водоустойчивые и неводоустойчивые.

В группе аммонитов для подземных работ выделяют аммониты

повышенной мощности, к которым следует отнести аммоналы, скальный аммонит и другие подобные вещества.

Аммониты для открытых работ. Наша промышленность выпускает два вида аммонитов, допущенных только для открытых работ, это аммониты № 9 и № 10.

Состав и основные свойства этих аммонитов приведены в табл. 22.

Таблица 22

Характеристики аммонитов, допущенных к применению только на открытых работах

Наименование аммонита	Состав аммонита, %			Кислородный баланс, %	Плотность, *г/см³*	Теплота взрыва при постоянном объеме и воде газообразной, *ккал/кг*	Объем газов, *л/кг*	Бризантность, *мм*	Работоспособность, *см³*	Передача детонации между патронами диаметром 32 *мм*, *см*
	аммиачная селитра	тротил	горючая добавка (древесная мука, жмых, и т. п.)							
Аммонит № 9	87	5	8	+2,9	0,9	857	930	10—12	300—320	2
Аммонит № 10 . .	85—87	8	5—7	+1,5	0,9	905	923	11—13	300—340	2—3

Благодаря большому содержанию горючих добавок склонность аммонитов № 9 и № 10 к слеживанию понижена.

Аммонит № 9 выпускают обычно в мешках или пакетах. Он имеет сравнительно низкую критическую плотность, близкую к 1,05—1,10 *г/см³*, и довольно большой критический диаметр. Поэтому аммонит № 9 следует применять в зарядах большого диаметра. При использовании патронов аммонита № 9 в шпурах, где создается зазор между ВВ и стенками шпура, наблюдаются отказы и неполные взрывы. В связи с этим применение патронированного аммонита № 9 в шпурах не рекомендуется.

Аммонит № 9 целесообразно употреблять на тех участках взрывных работ, где породы не очень крепкие и требуется получить сравнительно небольшое дробление взорванной массы.

Аммонит № 10 имеет более высокую детонационную способность. Критическая плотность его несколько выше, чем у аммонита № 9. Аммонит № 10 можно применять на всех открытых взрывных работах. С заводов его выпускают в мешках, пакетах, а иногда в патронах. Аммониты №№ 9 и 10 неводоустойчивы.

Аммониты для подземных взрывных работ, кроме шахт, опасных по газу и пыли. Для подземных взрывных работ, где условия работы зарядов более трудные, чем на открытых работах, аммониты выпускают с более высокими показателями бризантности, работоспособности и передачи детонации.

Таблица 23

Характеристики аммонитов средней мощности, допущенных к применению на подземных взрывных работах

Наименование аммонита	Состав аммонита		Кислородный баланс	Плотность в патронах, *г/см³*	Теплота взрыва при постоянном объеме и водогазообразной, *ккал/кг*	Объем газов, *л/кг*	Бризантность, *мм*	Работоспособность, *см³*	Передача детонации между патронами диаметром 32 *мм*, *см*	
	наименование компонентов	содержание, %							сухими	после часовой выдержки в воде в вертикальном положении
Аммонит № 6	Аммиачная селитра, тротил	79 21	+0,4	1,00—1,15	1028	892	14—16	360—380	5—8	Неводоустойчив
Аммонит № 6 прессованный	Аммиачная селитра, тротил	79 21	+0,4	1,25—1,35	1028	892	18	360—380	5—8	Неводоустойчив
Аммонит № 6 ЖВ	Водоустойчивая аммиачная селитра, тротил	79 21	—0,64	1,00—1,15	1025	900	14—16	360—380	5—8	3—5
Аммонит № 7	Аммиачная селитра, тротил, древесная мука	82 14 4	+0,55	1,00—1,10	962	910	13—15	350—360	4—6	Неводоустойчив
Аммонит В-3	Аммиачная селитра, тротил, асфальтит, парафин	82 16,5 1 0,5	—0,64	0,95—1,10	1003	910	14—16	360—380	3—5	2—3
Динафталит № 1	Аммиачная селитра, динитронафталин	88 12	+0,9	1,00—1,15	952	920	14,5— —15,5	320—350	4—5	Неводоустойчив
Динафталит № 1 ЖВ	Водоустойчивая аммиачная селитра, динитронафталин	88 12	0,0	1,00—1,20	976	917	15—16	320—350	3—4	2—4

Основные свойства аммонитов средней мощности для подземных работ приведены в табл. 23.

Все приведенные сорта аммонитов широко используются не только для подземных, но и для открытых взрывных работ. Особенно большое применение имеет порошкообразный аммонит № 6, который выпускают в мешках, пакетах и патронах. Отсутствие целлюлозных горючих (древесная мука, лигнин, торф) в составе аммонита приводит к повышенной его слеживаемости. Однако благодаря большому содержанию тротила аммонит № 6 обладает высокой детонационной способностью, которая сравнительно легко восстанавливается даже у слежавшегося аммонита после его разминания. Освоение выпуска аммонита № 6 на водоустойчивой аммиачной селитре еще больше расширяет область его применения.

Аммонит № 7 имеет показатели, близкие к показателям аммонита № 6. Однако практикой установлено, что аммонит № 7 следует применять для взрывов в менее крепких породах, чем аммонит № 6. Благодаря наличию в составе аммонита № 7 древесной муки, он обладает пониженной слеживаемостью. Аммонит № 7 выпускают в порошкообразном виде в мешках, пакетах и патронах.

Водоустойчивый аммонит В-3 выпускают в порошкообразном состоянии упакованным в мешки и патроны, а также в виде шнекованных зарядов диаметром 150—310 *мм* с плотностью 1,25—1,35 *г/см*^{3}.

Водоустойчивость аммонита В-3 такова, что в обычных патронах заводского изготовления он не теряет своих взрывчатых свойств после многочасового нахождения в вертикальных шпурах и скважинах, заполненных водой.

Патроны аммонита В-3 можно применять в обводненных шпурах с разрезанными оболочками, что позволяет повысить плотность заряжания шпуров. Шнекованные заряды из водоустойчивого ВВ выпускают в тонких неводоустойчивых оболочках. Динафталит № 1 и № 1 ЖВ выпускают в патронах и в мешках и применяют в породах такой же крепости как аммониты № 6 и В-3.

Взрывчатые свойства перечисленных ВВ недостаточны для эффективного ведения взрывных работ в особо крепких породах с трудными условиями работы заряда. Для указанных условий разработаны аммониты с более высокими бризантным и фугасным эффектами, или, как принято говорить, аммониты повышенной мощности.

Для получения ВВ повышенной мощности необходимо, чтобы потенциальная энергия его была наибольшей, а соотношение компонентов, детонационная способность и физическое состояние вещества должны быть такими, чтобы при взрыве в породе химические и термодинамические потери были минимальными.

В целях повышения теплоты взрыва и фугасности ВВ в его состав вводят алюминий.

Повышают потенциальную энергию и значительно улучшают детонационную способность аммиачно-селитренных ВВ добавки

Таблица 24

Характеристики аммонитов повышенной мощности

Наименование аммонита	Характерные компоненты состава (помимо селитры и тротила)	Кислородный баланс, %	Плотность, *г/см³*	Теплота взрыва при постоянном объеме и воде газообразной, *ккал/кг*	Объем газов, *л/кг*	Скорость детонации, *м/сек*	Бризантность, *мм*	Работоспособность, *см³*	Передача детонации между патронами диаметром 32—36 *мм*, *см*	
									сухими	после часовой выдержки в воде (вертикально)
Аммоналы ВА-2 и ВА-8	Алюминиевая пудра, стеарат кальция или асфальтит с парафином	−0,5 −0,0	1,00—1,10	1156	856	4000—4500	16—19	400—420	4—6	3—5
Аммонал ВА-4	Алюминиевая пудра, водоустойчивая селитра	+0,26	1,00—1,10	1176	845	4000—4500	16—19	400—430	4—7	3—6
Скальный № 1 прессованный	Гексоген, алюминиевая пудра, стеарат кальция	−2,2	1,45—1,55	1270	838	6000—6500	22—26	450—480	4—8	3—7
Скальный № 1 ЖВ прессованный	Гексоген, алюминиевая пудра, водоустойчивая селитра	−0,7	1,45—1,55	1290	830	6000—6500	23—27	450—480	6—8	4—7
Скальные № 1 и 1 № ЖВ (патронированный порошок)	Гексоген, алюминиевая пудра, стеарат или водоустойчивая селитра	−2,2 −0,7	0,95—1,10	1270—1290	830 —838	5000—5500	18—21	450—480	6—13	4—10
Скальный № 2 ЖВ	Гексоген, водоустойчивая селитра	+0,13	1,6	1166	892	6500—7000	25—30	420—440	7—10	6—10

высокомощных нитросоединений. Практическое применение для этих целей нашел главным образом гексоген.

Улучшения физических свойств аммонитов повышенной мощности достигают также приданием им водоустойчивости.

Характеристики некоторых сортов аммонитов повышенной мощности приведены в табл. 24.

Аммоналы могут быть использованы на открытых и подземных работах. Скальный аммонит (рис. 61) целесообразно использовать только на подземных работах в крепких породах, на проходке стволов шахт и других работах с трудными условиями взрывания. По характеру действия в породе он примерно соответствует высокопроцентным динамитам, однако значительно менее опасен в обращении.

Аммониты для шахт, опасных по газу и пыли (предохранительные). Предохранительными называют аммониты, содержащие в своем составе вещества, предотвращающие взрыв газовоздушных и

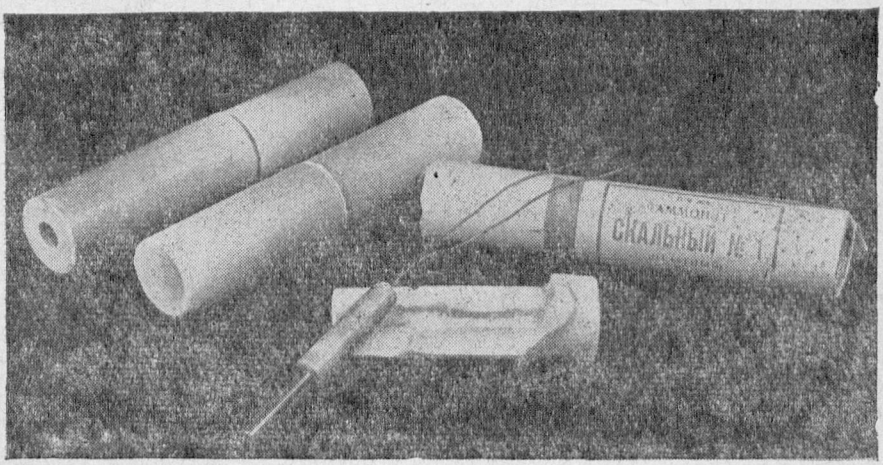


Рис. 61. Шашки и патрон скального аммонита № 1. В изломе показана шашка боевика с гнездом под электродетонатор замедленного действия

пылевоздушных смесей (пламегасители), и предназначенные для работ в горных выработках, опасных в отношении взрыва газа или пыли.

Наибольшее распространение в качестве пламегасителей получили хлористый натрий (поваренная соль—NaCl) и хлористый калий (KCl).

Аммониты, содержащие пламегасители, имеют пониженные детонационную способность, работоспособность и несколько меньший бризантный эффект, чем аммониты, не содержащие инертных примесей. Критический диаметр предохранительных аммонитов выше, чем у обычных, а критическая плотность ниже.

Аммониты, содержащие в качестве пламегасителя поваренную

соль, увлажняются и слеживаются больше, чем аммониты, содержащие хлористый калий.

Предохранительные аммониты разделяют на аммониты для взрывания породы и взрывания угля.

Аммониты, предназначенные для взрывания в шахтах, опасных по газу и пыли, не должны вызывать взрывов угольной пыли в опытном штреке при испытании их в зарядах весом 700 *г* и метановоздушной смеси при испытании зарядов весом 600 *г*.

Основные свойства некоторых предохранительных аммонитов приведены в табл. 25.

Таблица 25

Основные свойства некоторых предохранительных аммонитов

Наименование аммонитов	Пламегаситель		Кислородный баланс, %	Плотность в патронах, *г/см³*	Теплота взрыва при постоянном объеме и воде газообразной, *ккал/кг*	Объем газов, *л/г*	Бризантность, *мм*	Работоспособность, *см³*	Передача детонации между патронами диаметром 36 *мм*, *см*	
	наименование	содержание, %							сухими	после часовой выдержки в воде
Аммонит № 8 (угольный)	Хлористый натрий	20	+3,5	1,00—1,15	692	728	11—13	240—260	3—4	Неводоустойчив
Аммонит ПЖВ-20 (угольный)	Хлористый натрий	20	+0,72	1,05—1,20	803	720	13—14	265—280	4—5	2—3*
Аммонит АП-1 (породный)	Хлористый натрий	19,5	+0,57	1,00—1,15	800	727	13—14	260—280	4—5	Неводоустойчив
Аммонит П-2 (породный)	Хлористый калий	15	+0,06	1,00—1,15	857	765	13—14	285—300	4—6	Неводоустойчив
Аммонит АП-4ЖВ (породный)	Хлористый калий	15	+0,9	1,05—1,20	850	760	13—14	285—300	4—5	3—4**
Аммонит АП-5ЖВ (породный)	Хлористый натрий	12	0	1,05—1,20	906	782	14—16	320—330	4—8	2—3*

* После выдержки в воде в вертикальном положении.
** После выдержки в воде в горизонтальном положении.

Предохранительные аммониты выпускаются заводами только в патронах.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС ПРИГОТОВЛЕНИЯ АММИАЧНО-СЕЛИТРЕННЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ

Технологический процесс приготовления аммонитов состоит только из механических операций, при которых должна быть получена возможно более тонкая, сухая и однородная механическая смесь компонентов.

Качество аммонитов в большой степени зависит от тщательного выполнения технологических операций (табл. 26).

Увеличение бризантности аммонала ВА-2 в зависимости от увеличения времени обработки его в шаровой мельнице показано на рис. 62.

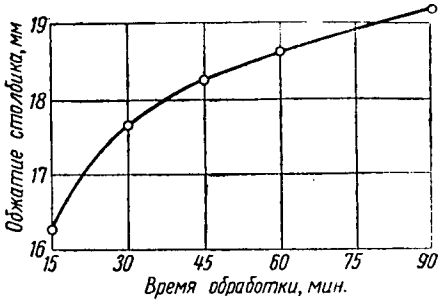


Рис. 62. Зависимость бризантности аммонала ВА-2 при плотности 1 *г/см*³ от времени обработки в шаровой мельнице (при оптимальной загрузке шаров и продукта)

Следует отметить, что такими простейшими операциями, как подсушивание, измельчение, обработка в шаровой мельнице, могут быть восстановлены первоначальные свойства аммонитов, подвергшихся увлажнению, слеживанию и перекристаллизации.

Таблица 26

Влияние технологической обработки аммонита № 6 на его некоторые взрывчатые характеристики

Режим смешивания компонентов	Бризантность, *мм*	Импульс патрона диаметром 32 *мм* при испытании на баллистическом маятнике, *кг·сек/см²*	Передача детонации, *см*	Скорость детонации в патронах (диаметром 32 *мм*), *м/сек*
Смешивание без шаров грубо измельченных компонентов	9	0,95	0 (Только впритык)	1800
Смешивание с шарами в течение 15 мин. предварительно измельченных компонентов	12	1,25	3	2780
Смешивание с шарами в течение 3,5 час. предварительно измельченных компонентов	17	2,12	5	4300

Технологическая схема производства простейшего двухкомпонентного аммонита приведена на рис. 63.

Подготовка аммиачной селитры. Заводы, изготовляющие ВВ, получают аммиачную селитру в крафт-целлюлозных мешках весом 40 *кг*.

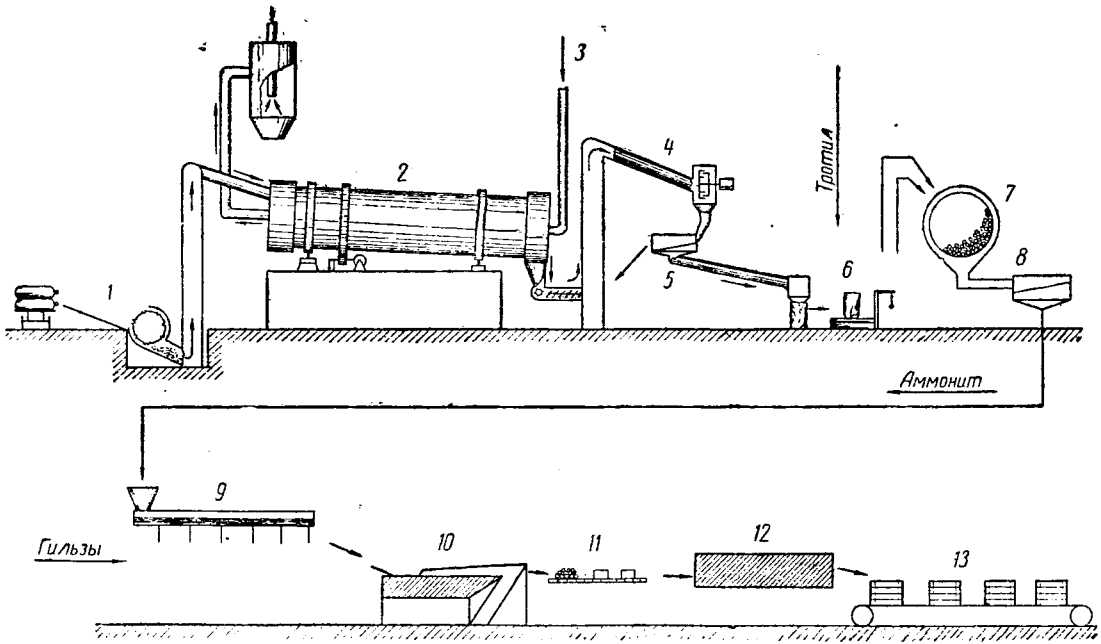


Рис. 63. Схема производства аммонитов: *1*—грубое дробление селитры; *2*—сушка; *3*—подача воздуха или топочных газов; *4*—тонкое дробление; *5*—просев; *6*—взвешивание селитры и тротила; *7*—обработка компонентов в смесительных барабанах; *8*—просев аммонита; *9*—патронирование; *10*—парафинирование патронов; *11*—упаковка в пачки; *12*—парафинирование пачек; *13*—укупорка в ящики

В большинстве случаев аммиачная селитра поступает в слежавшемся состоянии и первой операцией в ее подготовке является освобождение от мешков и грубое измельчение. Сильно слежавшуюся селитру обычно вручную разбивают на куски и загружают в фрезерные или щековые дробилки, из которых она выходит в виде мелких кусков и зерен.

Сушат аммиачную селитру в сушильных барабанах непрерывного действия, имеющих длину 5—8 *м* и диаметр 1,0—1,5 *м* и вращающихся со скоростью 2—4 об/мин. Внутри барабанов находятся полки, которые позволяют поддерживать селитру во вращающемся барабане во взвешенном состоянии.

Барабан устанавливают с наклоном 3—5° в сторону выхода сухой селитры.

Сушат селитру подогретым в калориферах воздухом или очищенными топочными газами. Существуют два способа сушки аммиачной селитры—прямоточный и противоточный. При прямоточном способе горячий воздух или топочные газы подводят к месту ввода селитры в барабан, а при противоточном воздух или газы подают к месту выхода селитры из барабана. Последний способ следует считать более производительным, так как аммиачная селитра по мере высушивания встречает более горячую и сухую струю воздуха или газов, что дает возможность быстрее и лучше высушить ее. Подаваемый в сушильный барабан воздух или газ обычно имеет при входе температуру 120—140°, а на выходе—60—70°.

Высушенная селитра должна содержать не более 0,2% влаги. Затем селитру подвергают дополнительному измельчению (тонкое дробление). Чаще всего для этого используют дезинтеграторы, но лучшими являются двухступенчатые кулачковые мельницы. После этого селитру пропускают через сито-бурат. Измельченная селитра при ситовом анализе должна на 70—80% проходить через сито № 15. После измельчения селитру передают на операцию смешивания.

Последовательность операций сушки и измельчения селитры может быть и другой. На некоторых заводах тонкое дробление селитры производят как до сушки, так и после сушки.

Подготовка тротила. В последнее время большинство заводов для приготовления аммонитов использует чешуйчатый тротил, без дополнительной обработки его.

На отдельных заводах тротил подвергают предварительному измельчению в деревянных шаровых мельницах с деревянными или пластмассовыми шарами.

Смешивание компонентов. Для смешивания компонентов могут быть использованы шаровые мельницы (рис. 64) и другие смесительные аппараты непрерывного или периодического действия.

При обработке материалов в шаровых мельницах по существу происходят два процесса: смешивание и измельчение составных частей аммонита.

В настоящее время мельницы изготовляют из нержавеющей стали. Их заключают в кожух, предохраняющий помещение от

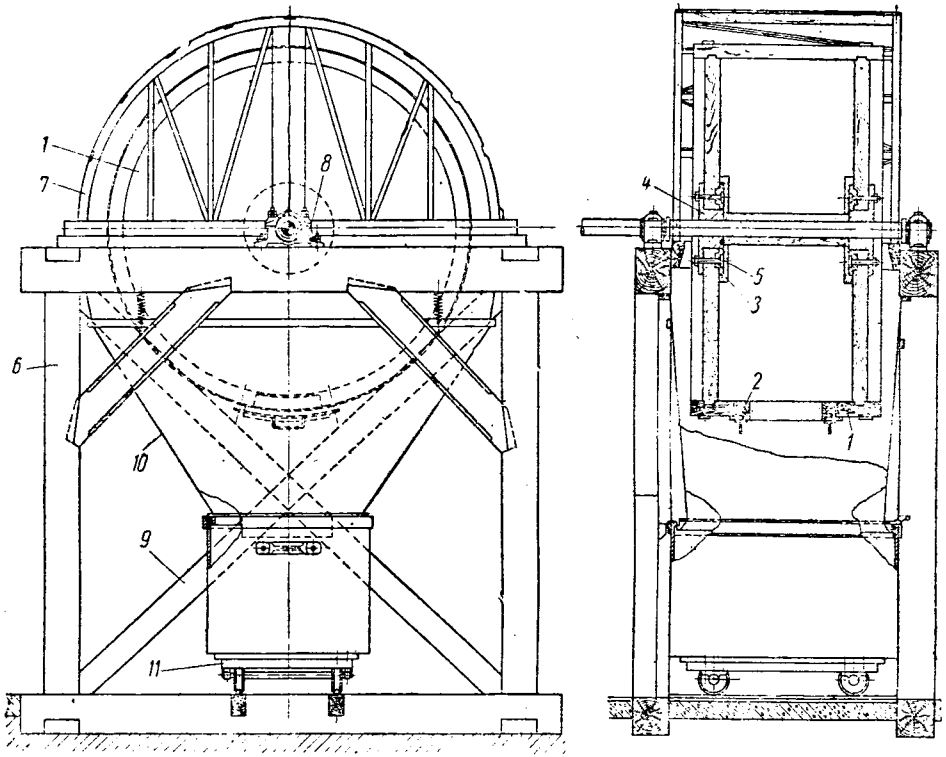


Рис. 64. Смесительный барабан (шаровая мельница для аммонитов): *1* — барабан; *2* — крышка; *3*, *4* и *5* — уплотняющие устройства; *6* и *9* — части станины; *7* и *10* — части кожуха; *8* — подшипник; *11* — вагонетка

запыления и облегчающий процесс выгрузки смешиваемого материала из аппарата.

Для наилучшего смешивания и измельчения исходных компонентов скорость вращения шаровых мельниц рассчитывают таким образом, чтобы шары, прижатые центробежной силой к стенкам мельницы, могли подняться на максимальную высоту и затем под действием силы тяжести упасть, производя при этом дробление материала. При диаметре мельницы около 1,5 *м* скорость вращения мельницы составляет 23—26 об/мин.

Мельницу обычно загружают шарами на 30—45% ее объема. Подлежащая смешиванию масса должна занимать 20—30% объема мельницы. При использовании деревянных шаров весовое соотношение между шарами и смешиваемым материалом близко к 1. В случае, когда требуется особо тщательная обработка смеси, весовое соотношение между смесью и шарами доводят до 1 : 2. Относительное увеличение количества шаров при одном и том же времени обработки дает возможность повысить качество аммонита, но снижает производительность аппаратуры.

От правильного выбора материала шаров зависит качество получаемых аммонитов, минимальный износ шаров и безопасность производства.

Для смешивания аммонитов чаще всего используют деревянные шары, преимущественно из твердых пород дерева: бокаут, дуб и другие или лигностоновые (из прессованной древесины). На некоторых заводах применяют пластмассовые шары.

Повышение до некоторого предела удельного веса материала шаров улучшает качество продукта.

Диаметр шаров должен быть близок к $^1/_{20}$ диаметра мельницы. Лучшие результаты бывают в том случае, когда применяют шары нескольких размеров (больше и меньше указанного). По мере износа шаров очень маленькие шары удаляют, а вместо них загружают шары больших размеров. Таким образом, в мельнице всегда имеются шары нескольких размеров, однако суммарный вес их существенно не отличается от принятого для данного режима работы мельницы.

Материалы, загружаемые в мельницы, дозируют весовым или объемным способом. Для загрузки периодически действующих мельниц применяют весовое дозирование исходных материалов, которые взвешивают в этом же помещении на весах соответствующей грузоподъёмности и точности.

При производстве аммонитов с легкоплавкими гидрофобными добавками (парафин, парафинистый мазут) последние загружают в мельницу подогретыми до 50—60°.

Технологический процесс смешивания предохранительных аммонитов и аммонитов, содержащих высокомощные взрывчатые вещества (гексоген), несколько отличается от описанного.

При смешивании предохранительных аммонитов иногда требуется получить продукт, в котором пламегаситель содержался бы в виде достаточно крупных кристаллов. Тогда пламегаситель загру-

жают в мельницу не одновременно с остальными компонентами, а позднее, за 5—10 мин. до окончания процесса смешивания всех компонентов.

В целях повышения безопасности производства аммонитов, содержащих такие вещества, как гексоген или тэн, процесс смешивания проводят в две стадии. Сначала приготовляют смесь всех исходных компонентов, кроме высокомощного ВВ, а затем полученный продукт перегружают в другую мельницу, где его без шаров смешивают с требуемым количеством гексогена или тэна.

Время смешивания компонентов устанавливают для каждого сорта аммонита в зависимости от предъявляемых к нему технических требований и характеристик смесительных мельниц (размера их, числа оборотов, количества загружаемых шаров и продукта и

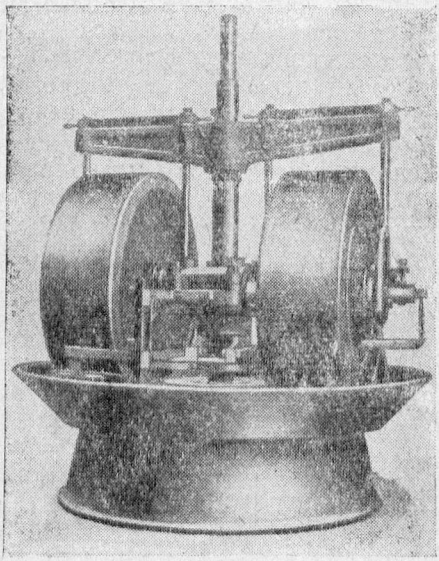


Рис. 65. Бегуны

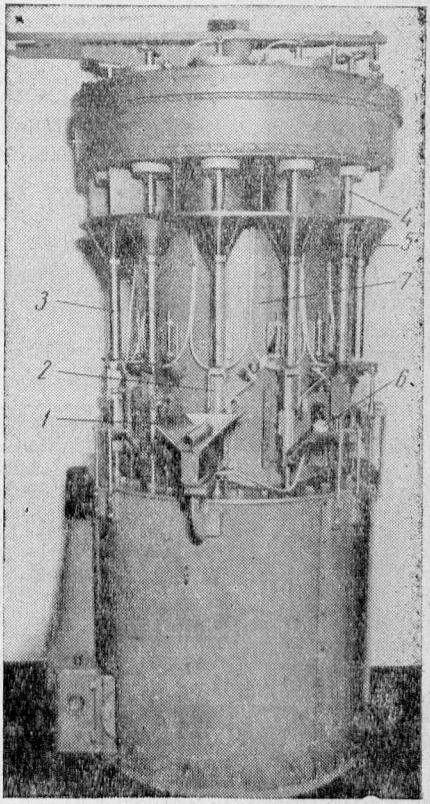


Рис. 66. Автомат для патронирования аммонитов

пр.). Продолжительность смешивания для разных аммонитов устанавливается от 20 до 90 мин.

Технологический процесс приготовления динафталита № 1 и № 1 ЖВ в стадии смешивания существенно отличается от приготовления остальных аммонитов.

Смешивание и совместное измельчение компонентов динафталита производят на бегунах (рис. 65). Обработанный на бегунах

динафталит выходит в виде лепешки, которую затем дробят на вальцах таким образом, чтобы в готовом продукте содержалось не менее 20% зерна.

Технологический процесс производства динамонов сходен с процессом производства аммонитов. Он отличается лишь тем, что вместо тротила применяются горючие вещества, которые поступают на смешивание после предварительной сушки и измельчения.

Патронирование и упаковка. Вид упаковки и способ патронирования выбирают в зависимости от сорта и назначения аммиачно-селитренных ВВ.

Патроны изготовляют диаметром от 31 до 45 *мм*. В отдельных случаях по заказу потребителей патроны делают диаметром до 80 *мм*.

Аммиачно-селитренные ВВ патронируют на патронировочных машинках, принцип действия которых заключается в том, что порошкообразный состав под определенным давлением подают шнеком в бумажную гильзу патрона. На таких аппаратах достигается равномерная плотность набивки патронов. Производительность патронировочных машинок высокая. Еще более производительными являются патронировочные автоматы.

На автомате системы Хотулева (рис. 66) бумажные гильзы из гильзового автомата поступают в приемник *1*, ставятся в вертикальное положение и захватываются каретко́й *2*. Далее гильзы надеваются на рожок *3* и наполняются с помощью шнек-винта *4* взрывчатым веществом, находящимся в воронке *5*. Специальными приспособлениями производится заделка торцов гильз. Цикл заканчивается выдачей готового патрона *6*. Все операции совершаются последовательно и непрерывно при вращении ротора *7* автомата.

При выпуске аммонитов в прессованном виде шашки прессуют на гидравлических или механических прессах. Часть запрессованных шашек изготавливают с гнездом, предназначенным для помещения в него капсюля-детонатора или электродетонатора (см рис. 61). Патроны прессованного аммонита обычно составляют из двух шашек, которые оборачивают бумагой.

Патроны покрывают мастикой или парафином, пропуская их через парафинировочные ванны или подвергая опрыскиванию парафином в пульверизационных камерах. Во избежание образования большого количества ядовитых газов в продуктах взрыва вес бумажных гильз и количество парафина или мастики на патронах строго регламентируется.

Количество бумаги не должно превышать 2 *г*, а количество парафина—2,5 *г* на 100 *г* ВВ.

Патроны упаковывают в пачки обычно по 10 штук. Пачки парафинируют, а затем укладывают в деревянные или металлические ящики, обложенные внутри парафинированной или пропитанной мастикой бумагой. Все металлические ящики и часть деревянных ящиков делают разборными с тем, чтобы их удобно было

возвращать заводам-изготовителям ВВ после использования аммонита.

Шнекованные заряды изготовляют на шнек-аппаратах, где уплотнение состава производят шнек-винтом в специальной изложнице. После шнекования заряды из водоустойчивого аммонита В-3 заворачивают в парафинированную или покрытую мастикой бумагу и обвязывают шпагатом так, чтобы на торцовой части имелась петля, с помощью которой патроны при зарядке опускают в скважины. Затем шнекованные заряды упаковывают в деревянные ящики.

Качество аммонитов контролируют на заводах в процессе их изготовления и при комплектации партий, а также на местах потребления при нарушении тары во время перевозок, в конце гарантийного срока их хранения и во всех случаях, когда качество аммонитов вызывает сомнение.

На заводах контролируют влажность и степень измельчения компонентов и готовых аммонитов, плотность патронов, бризантность, передачу детонации и водоустойчивость у водоустойчивых аммонитов. Работоспособность аммонитов проверяют периодически.

Предохранительные аммониты испытывают в опытных штреках на воспламеняемость метана и угольной пыли.

На местах потребления качество аммонитов обычно проверяют по способности их передавать детонацию в сухом состоянии или после выдержки в воде. Если аммонит дает отклонение по показателям передачи детонации, устанавливают причину таких отклонений, последовательно определяя влажность, степень слежалости (качественно), плотность патронов, бризантность и другие характеристики.

ГЛАВА XVI

ДЫМНЫЕ ПОРОХА И ПОРОХОПОДОБНЫЕ ДИНАМОНЫ

ДЫМНЫЕ ПОРОХА И ИХ СВОЙСТВА

Дымные пороха представляют собой группу веществ, способных к горению и взрыву. При зажигании пороха в замкнутом пространстве он сгорает с большой скоростью и, развивая при этом значительное давление, может произвести некоторую механическую работу. Так как нарастание давления при сгорании порохов идет сравнительно медленно, то эта работа проявляется в виде раскалывающего или метательного действия. Поэтому при классификации взрывчатых веществ пороха обычно относят к категории метательных ВВ. Если же дымные пороха в шпурах инициировать не зажиганием, а взрывом капсюля-детонатора, то они способны взрываться с некоторым бризантным эффектом, образуя трещины в отрываемом массиве.

Ценным свойством дымных порохов, используемым для некоторых взрывных работ, является способность их действовать при сго-

рании в зарядных камерах без бризантного эффекта, откалывая и сдвигая породу по линии шпуров или скважин. При этом в породе совершенно не образуется трещин и даже микротрещин (видимых только через увеличительные приборы). Благодаря этим качествам дымные пороха применяют при добыче штучного камня, который идет для облицовочных работ, изготовления памятников, художественных изделий и пр.

Практическое применение дымных порохов для взрывных работ ограничивается чрезвычайной опасностью их в обращении, обусловленной высокой чувствительностью к огню и трению.

Дымные пороха представляют собой механические смеси калиевой селитры, серы и древесного угля. Калиевая селитра действует как окислитель, который при разложении выделяет кислород, необходимый для окисления горючих—угля и серы. Наиболее употребительным на взрывных работах является минный порох, содержащий: 75% калиевой селитры, 15% древесного угля и 10% серы.

По внешнему виду дымные пороха представляют собой зерна однообразного черного или как принято их характеризовать аспидно-серого цвета со слегка блестящей поверхностью. Величина зерен крупного пороха от 3 до 8,5 *мм*, а мелкого—1,5—3 *мм*. Действительная плотность пороховых зерен находится в пределах 1,60—1,75, а гравиметрическая—в пределах 0,9—1,0 *г/см*^{3}.

Содержание пылеобразной пороховой массы в зерненом порохе почти не допускается. В крупнозернистом порохе его может быть не больше 0,2%, а в мелком—не более 0,1%. Пороховая масса должна быть настолько однородной, чтобы при рассмотрении раздавленного порохового зерна в лупу пятикратного увеличения не было заметно белого налета выкристаллизовавшейся селитры, желтоватых крупинок серы и каких-либо посторонних включений.

Дымный порох гигроскопичен. Влажность пороха допускается не выше 1%. При поглощении порохом влаги более 1% он теряет блеск, становится матово-черным и слипается в комки.

В практических условиях использования свойства пороха, увлажнившегося до 3—4%, еще можно восстановить подсушиванием. После этого по внешнему виду порох не будет заметно отличаться от неувлажнившегося. Если же подсушить порох, который перед этим увлажнился до 5%, то на зернах будет заметен белый налет селитры, и действие его будет ослаблено по сравнению с действием кондиционного пороха. При увлажнении пороха от 7 до 14% наблюдается набухание зерен, нарушение их структуры и к использованию по назначению такой порох непригоден, даже после сушки.

Дымный порох чрезвычайно чувствителен к действию пламени и искр. Даже от искры, образовавшейся при ударе друг о друга металлических предметов, он загорается. При нагревании он вспыхивает при температуре 270—300°.

Чувствительность дымного пороха к удару можно характеризовать следующими данными. При падении груза весом 10 *кг* с высоты 45 *см* наблюдается 100% взрывов; с высоты 25 *см*—50% взрывов, а с высоты 10 *см*—10% взрывов.

Чувствительность к трению у дымного пороха очень высокая. Так как в практических условиях использования обычно наблюдается совместное действие удара и трения, то в обращении порох очень опасен. Высокая чувствительность дымного пороха к тепловым и механическим импульсам неоднократно приводила к преждевременным взрывам или загоранию его.

В шпурах или скважинах дымный порох сгорает со скоростью около 400 *м/сек*. Запрессованный до плотности 1,8 *г/см*^{3}, он приобретает способность гореть параллельными слоями и с меньшей скоростью.

Высококачественный порох, помещенный на бумагу тонким слоем, при сгорании не должен давать остатков и прожигать бумагу.

Производство дымного пороха. Производство дымного пороха в принципе сходно с производством аммонитов (рис. 67). В обоих случаях требуется получить, по возможности, более однородную механическую смесь исходных компонентов. Однако требования к качеству смешивания компонентов в производстве пороха значительно выше. Наличие серы в составе пороха делает производство опасным и сложным.

Смешивание сразу всех трех компонентов пороха опасно. Поэтому вначале процесс смешивания ведут раздельно. В одной шаровой мельнице смешивают хорошо высушенные и измельченные селитру с углем, а во второй—уголь и серу. Затем эти двойные смеси по достижении определенной степени однородности и тонины помола загружают в требуемом соотношении в смесительный барабан, покрытый внутри (футерованный) деревом или кожей. Такие смесительные барабаны обычно находятся в отдельном помещении, в которое не разрешается входить во время процесса смешивания.

Готовую пороховую массу обрабатывают на бегунах (см. изготовление динафталита) и передают на прессование. На обогреваемых или на холодных

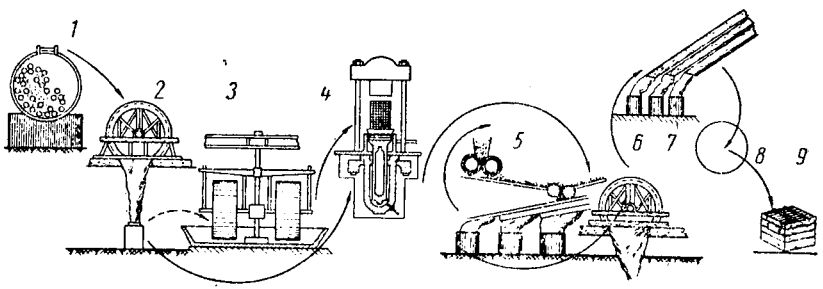


Рис. 67. Схема производства дымного пороха: *1* — измельчение составных компонентов; *2* — приготовление тройного состава; *3* и *4* — уплотнение тройного состава; *5* — зернение; *6* — полировка; *7* — сортировка и чистка; *8* — мешка пороха; *9* — укупорка

прессах получают пластины (лепешки) определенной толщины и с плотностью 1,8 *г/см*^{3}. Затем пороховые пластины измельчают, зернят, а иногда и полируют. После этого отдельные фракции сортируют по крупности зерен, продукт сушат, отделяют от пыли и направляют на укупорку и хранение.

ПОРОХОПОДОБНЫЕ ДИНАМОНЫ (ДИНАМОНЫ ДЛЯ ДОБЫЧИ ШТУЧНОГО КАМНЯ)

С целью уменьшения опасности ведения взрывных работ по добыче штучного камня и снижения их стоимости были разработаны и испытаны в производственных условиях порохоподобные динамо-

ны (динамоны для добычи штучного камня). Составы таких динамонов отличаются от состава пороха тем, что в них калиевая селитра полностью или частично заменена более дешевой аммиачной селитрой и совсем исключена из рецептуры сера. Основными компонентами порохоподобных динамонов являются аммиачная селитра, калиевая селитра (не во всех составах) и древесный уголь (лиственных пород). Для придания порохоподобным динамонам водоустойчивости в их состав вводят гидрофобные добавки—асфальтит либо асфальтит с парафинистым мазутом или парафином. Наличие этих добавок в составах порохоподобных динамонов улучшает их прессуемость, что позволяет сравнительно легко зернить динамоны путем прессования или вальцевания и последующего дробления.

В результате использования в составе динамонов для добычи штучного камня аммиачной селитры (вместо калиевой у дымного пороха) количество газообразных веществ в подуктах взрыва получается больше и, следовательно, работоспособность его выше работоспособности дымного пороха. Во то же время воспламеняемость динамона значительно ниже воспламеняемости порохов. Порохоподобные динамоны не воспламеняются не только от отдельной искры, но даже от луча огня огнепроводного шнура и от спички. Для воспламенения динамона требуется специальный воспламенитель из дымного пороха или подобного ему воспламенительного состава (в количестве 5—15 *г*).

При взрывании капсюлем-детонатором порохоподобные динамоны дают значительный бризантный эффект (8—12 *мм* при плотности 0,8 *г/см*^{3}).

Основной характеристикой качества порохоподобных динамонов является их скорость горения. В порошкообразном виде динамоны имеют очень небольшую скорость горения, равную при испытании в открытых стальных трубах диаметром 26—28 *мм* всего лишь 0,03—0,08 *см/сек*. Пороховая мякоть в подобных условиях горит со скоростью около 1,8 *см/сек*.

Зернение порохоподобного динамона повышает скорость его горения. Зерна с размерами 7—8 *мм* и плотностью около 1,3 *г/см*^{3} горят со скоростью 0,15 *см/сек*. Дымный порох в аналогичных условиях сгорает гораздо быстрее. По характеру горения в замкнутом пространстве (в шпуре или железной трубе) порохоподобные динамоны приближаются к дымному пороху. По эффекту действия в породе порохоподобные динамоны сходны с дымным порохом. Отрываемая ими порода не дробится и, как правило, не имеет трещин.

Расход порохоподобных динамонов на 1 *м*^{3} взорванной породы по сравнению с дымным порохом в 1,5—2,5 раза меньше. Это объясняется тем, что при разложении (горении) порохоподобных динамонов тепловой эффект их выше и количество газов в продуктах взрыва больше, чем у дымного пороха (количество газообразных продуктов разложения у дымного пороха равно примерно 330 *л/кг*, а у порохоподобных динамонов — 780 — 990 *л/кг*).

Для получения хорошего эффекта действия порохоподобных динамонов в шпурах или скважинах необходимо (так же, как и

при применении дымных порохов) применять хорошую, плотную забойку. В случае плохой забойки получается действие, подобное выстрелу—забойку выбивает, а порохоподобный состав (или порох) выгорает, не производя никакого разрушения породы.

Большим преимуществом порохоподобных динамонов по сравнению с дымным порохом является незначительная чувствительность их к удару и трению, что обусловливает возможность перевозки и хранения порохоподобных динамонов вместе с аммиачно-селитренными ВВ.

Производство порохоподобных динамонов. Производство порохоподобных динамонов значительно проще, чем производство порохов.

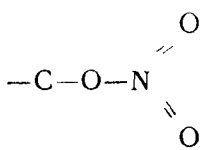
Процессы подготовки и смешивания компонентов не представляют никакой опасности. Поэтому смешивание в деревянных шаровых мельницах выполняют в одну стадию и готовую смесь подвергают зернению, которое можно производить прессованием шашек или «лепешек» с последующим их дроблением до нужных размеров. Уплотнение порошкообразной массы для зернения достигается также вальцеванием на обогреваемых или холодных вальцах. Зерна могут быть произвольной формы с размерами в наибольшем ребре или по диаметру 7—8 *мм*.

Зерненые порохоподобные составы упаковывают в бумажные пакеты, которые затем укладывают в деревянные ящики.

ГЛАВА XVII

НИТРОЭФИРЫ (НИТРАТЫ)

Нитроэфиры содержат в своих молекулах нитратную группу ONO_2, или, как иногда говорят, нитрогруппу NO_2, связанную с углеродным атомом органического вещества через кислород:



Наличие такой нитратной группы обусловливает у большинства нитроэфиров особые свойства, а именно: ограниченную химическую стойкость, высокую чувствительность к механическим и тепловым воздействиям и большую восприимчивость к взрыву других ВВ. Поэтому нитроэфиры опасны в обращении. Однако благодаря высокой мощности и, следовательно, эффективности при применении их широко используют в качестве составных частей динамитов, нитроглицериновых ВВ и бездымных порохов.

За последнее время все большее применение находит тэн, отличающийся сравнительно высокой химической стойкостью.

НИТРОГЛИЦЕРИН (ГЛИЦЕРИНТРИНИТРАТ)

Нитроглицерин $[C_3H_5(ONO_2)_3]$, который правильнее называть глицеринтринитрат, в химически чистом состоянии представляет собой маслянистую вязкую бесцветную и прозрачную жидкость. Техни-

ческий нитроглицерин имеет желтоватый или даже желто-коричневый цвет и сладковато-жгучий вкус. При комнатной температуре (15—16°) нитроглицерин не имеет запаха, но с повышением температуры летучесть его заметно возрастает и при 50° он имеет своеобразный сладковатый запах.

Нитроглицерин—тяжелая жидкость, удельный вес которой при температуре 4°—1,614, а при 20°—1,591. Жидкий нитроглицерин при охлаждении способен затвердевать в двух формах—в стабильной и лабильной (неустойчивой) (табл. 27).

Таблица 27

Точки затвердевания нитроглицерина

Сорт нитроглицерина	Внешний вид	Температура затвердевания, град.	
		лабильной формы	стабильной формы
Химически чистый	Прозрачный, бесцветный	2,1	13,2
Технический	Желтоватый	1,9	12,3

В составе взрывчатых веществ нитроглицерин затвердевает при температуре около +10°.

Жидкое состояние нитроглицерина при обычных температурах и высокая чувствительность не позволяют использовать его в чистом виде на взрывных работах. До тех пор, пока не были найдены способы использования нитроглицерина в составе порошкообразных или пластичных смесей, обладающих меньшей чувствительностью, чем жидкий нитроглицерин, его применение ограничивалось опытными работами.

Нитроглицерин хорошо растворяется в большинстве органических растворителей (ацетон, бензол, спирт и др.) и плохо растворяется в воде. В 100 *мл* воды при 15° растворяется 0,16 *г*, а при 50°—0,25 *г* нитроглицерина.

Очень важным свойством нитроглицерина является способность его растворять нитросоединения и нитроцеллюлозу. При растворении нитроцеллюлозы (пироксилина, коллодионного хлопка) образуется коллоидный раствор, который по свойствам существенно отличается как от нитроглицерина, так и от растворенной в нем нитроцеллюлозы. При растворении в 100 *г* нитроглицерина 2,5 *г* коллодионного хлопка образуется эластичная режущаяся ножом и сохраняющая свою форму студнеобразная масса (желатина), чувствительность которой к механическим воздействиям ниже чувствительности нитроглицерина. Добавка нитросоединений к такой массе способствует ее лучшей желатинации. С повышением температуры процесс желатинации ускоряется и при температуре 60—65° протекает довольно быстро.

Химическая стойкость химически чистого нитроглицерина достаточно высока. В литературе описан случай, когда в Швеции была обнаружена скважина, наполненная нитроглицерином, как предпо-

лагают, 38 лет назад; анализ этого нитроглицерина показал его удовлетворительную стойкость.

Однако при самой незначительной кислотности и загрязнении побочными продуктами, получающимися в процессе производства, химическая стойкость нитроглицерина сильно снижается. Выделяющиеся при химическом разложении окислы азота являются катализаторами (ускорителями) реакции разложения. Химическое разложение сопровождается выделением значительного количества тепла, в результате чего может произойти самовозгорание и взрыв нитроглицерина.

Наиболее распространенным способом проверки химической стойкости нитроглицерина и продуктов, содержащих его, является проба с иодокрахмальной бумажкой (см. главу 4).

Стойким считается нитроглицерин, у которого время до появления бурого окрашивания иодокрахмальной бумажки при 75° не менее 15 минут. Такой нитроглицерин допускается для изготовления динамитов и нитроглицериновых взрывчатых веществ.

При производстве порохов к нитроглицерину предъявляют еще более высокие требования: он должен вызывать окрашивание иодокрахмальной бумажки при температуре 72° не ранее, чем через 30 минут.

Чувствительность нитроглицерина к механическим воздействиям очень высока. Если сравнивать те максимальные высоты падения груза весом 2 *кг*, от удара которого еще не происходит взрыва ни у одной из шести навесок испытуемого вещества, то для тротила она будет в пределах 60—180 *см*, а у нитроглицерина всего 4 *см*. Еще выше чувствительность к удару у подогретого нитроглицерина. При температуре 40° он способен взрываться при падении груза весом 0,25 *кг* с высоты 5—10 *см*. Замерзший нитроглицерин считается значительно менее чувствительным к удару, чем жидкий, но в полузамерзшем состоянии он обладает наибольшей чувствительностью.

Температура вспышки нитроглицерина, имеющей характер взрыва, равна примерно 180°. Небольшое количество нитроглицерина, рассредоточенное в тонком слое, при зажигании сгорает голубоватым пламенем с небольшими вспышками и потрескиванием. Горение нитроглицерина в больших количествах всегда переходит в детонацию.

Восприимчивость нитроглицерина к взрыву другого ВВ также высока. Детонация жидкого нитроглицерина вызывается взрывом 0,25 *г* гремучей ртути. В замерзшем состоянии нитроглицерин менее восприимчив и детонация его вызывается взрывом 2 *г* гремучей ртути.

Взрывчатые свойства. Нитроглицерин имеет высокую теплоту взрыва, превосходящую теплоту взрыва почти всех твердых нитросоединений; она равна примерно 1500 *ккал/кг*. Нитроглицерин способен детонировать с двумя скоростями: со скоростью 1000—2000 *м/сек* и около 7600 *м/сек*.

Бризантность нитроглицерина по стандартной пробе при испытании в жестяном цилиндрике на свинцовых столбиках равна пример-

но 18,5 *мм*. Однако наблюдались случаи, когда при определении бризантности свинцовый столбик разбивался.

Расширение в свинцовой бомбе, определяемое при применении обычной песчаной забойки, равно 550 *см*^{3}, а при водяной забойке— 590 *см*^{3}.

Физиологическое действие. Нитроглицерин ядовит, он вредно действует на нервную систему человека. Сильные отравления организма происходят при попадании нитроглицерина на кожу человека. Например, работа с нитроглицерином голыми руками вызывает мучительную головную боль. Однако через 2—5 дней постоянной работы с нитроглицерином, в зависимости от индивидуальных особенностей, организм человека вырабатывает иммунитет к действию нитроглицерина через кожу.

Производство нитроглицерина. Так же, как и при получении нитросоединений, основной реакцией в производстве нитроглицерина является реакция нитрации. Общая схема периодического способа производства нитроглицерина показана на рис. 68.

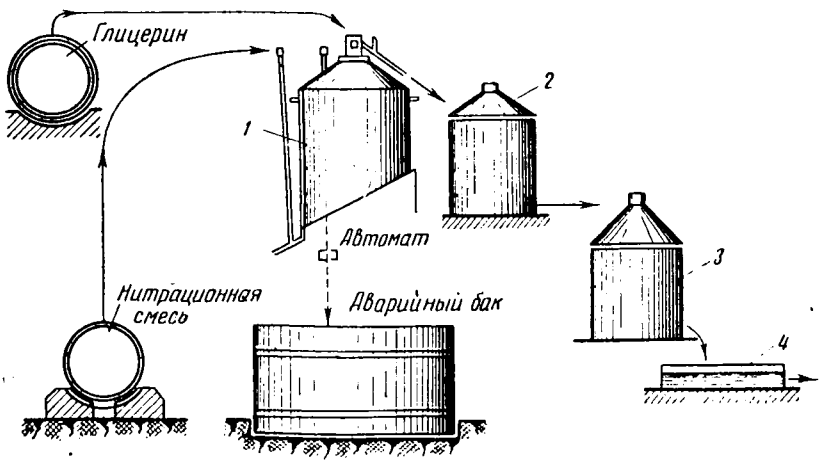


Рис. 68. Общая схема производства нитроглицерина: *1* — нитрование и сепарация; *2* — предварительная промывка; *3* — окончательная промывка; *4* — фильтрация

Сырьем для производства нитроглицерина служит специальный сорт глицерина (так называемый динамитный), который должен отличаться большой чистотой. Глицерина в нем должно быть не менее 98,5%, а воды — менее 1%.

Во избежание окислительных процессов и для большего выхода чистого нитроглицерина при его нитрации подбирают соответствующее соотношение азотной и серной кислот. Реакция нитрации осуществляется в одну стадию и ведется в аппаратах, называемых нитраторами-сепараторами (рис. 69). Для перемешивания массы в нитраторе обычно применяют сжатый воздух, чтобы избежать возможных ударов или толчков при работе механической мешалки и попадания нитроглицерина в трущиеся части ее. Температура при нитрации должна быть не выше 23°. Поэтому реакционную массу охлаждают, пропуская воду через змеевик, расположенный в нитраторе.

После окончания нитрации нитроглицерин и отработанная кислота расслаи-

ваются (сепарируются) благодаря разности их удельных весов. Удельный вес нитроглицерина 1,6, а удельный вес отработанной кислоты примерно 1,7. Отстоявшийся нитроглицерин тщательно промывают водой, затем 1—3-процентным раствором соды, а потом опять водой. Промытый нитроглицерин пропускают через фланелевые фильтры и сливают в специальные сосуды для хранения.

В последнее время большое значение приобретает непрерывный метод нитрации нитроглицерина и автоматизация его производства. Непрерывный способ нитрации глицерина безопаснее и экономичнее периодического. При одинаковой производительности обоих способов количество находящегося в мастерской нитроглицерина при непрерывном способе производства в 4—5 раз меньше, чем при периодическом.

Обычно отдельные фазы производства (нитрация, промывка, фильтрация) расположены в отдельных помещениях—мастерских, а на пути передачи нитроглицерина из одной мастерской в другую или между отдельными аппаратами устанавливают специальные прерыватели детонации. Кроме того, в целях уменьшения опасности перекачек нитроглицерина, разработаны различные способы передачи его в виде водной суспензии, которая имеет пониженную детонационную способность.

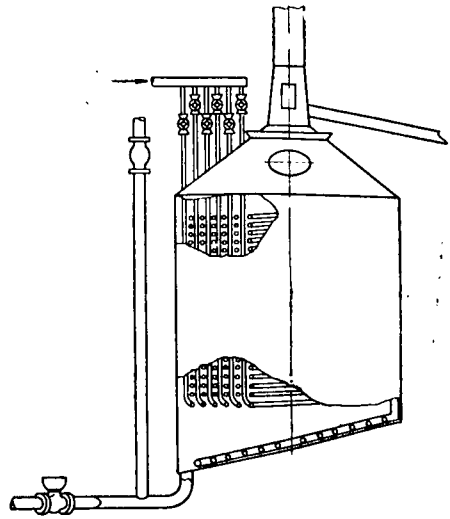


Рис. 69. Нитратор-сепаратор

Мастерские по производству нитроглицерина, а также места его хранения всегда обваловывают.

НИТРОГЛИКОЛЬ (ЭТИЛЕНГЛИКОЛЬДИНИТРАТ)

Этиленгликольдинитрат $[C_2H_4(ONO_2)_2]$, который чаще называют динитрогликоль или просто нитрогликоль, по своим свойствам во многом сходен с нитроглицерином.

Этиленгликольдинитрат—сложный эфир этиленгликоля и азотной кислоты Известен он с 1870 г., однако производственное распространение получил только в последние 40—50 лет. Так же, как и нитроглицерин он идет на изготовление динамитов и подобных им взрывчатых веществ.

Нитрогликоль—прозрачная жидкость с удельным весом 1,496. Нитрогликоль мало гигроскопичен. Он хорошо растворяется в большинстве органических растворителей. Растворимость его в воде мала, хотя несколько и выше, чем у нитроглицерина. При 15° в 100 *мл* воды растворяется 0,62 *г* нитрогликоля, а при 50°—0,92 *г*. Нитрогликоль летуч. Его летучесть примерно в три раза превышает летучесть нитроглицерина.

Способность к желатинированию у нитрогликоля выше, чем у нитроглицерина. Процесс желатинирования нитрогликоля коллодионным хлопком протекает полностью даже при обычной температуре (около 20°).

Очень ценным свойством нитрогликоля, которое широко используется в производстве динамитов и нитроглицериновых взрывчатых веществ, является более низкая по сравнению с нитроглицерином температура замерзания и способность образовывать с нитроглицерином растворы, имеющие сравнительно низкую температуру затвердевания. Температура затвердевания чистого нитрогликоля по определениям разных исследователей находится в пределах от —20 до —22,75°. Температуры затвердевания смеси нитрогликоля с нитроглицерином показаны в табл. 28.

Таблица 28

Температуры затвердевания смеси нитрогликоля с нитроглицерином

Содержание компонентов в смеси, %		Температура затвердевания, град.
нитрогликоль	нитроглицерин	
0	100,0	+13,5
30,6	69,4	—17,6
35,05	64,95	—21,1
40,2	59,8	—23,7
100,0	0	—22,75

Химическая стойкость нитрогликоля не высока. Пробу с иодокрахмальной бумажкой нитрогликоль выдерживает только в течение 2—4 мин. Однако эта проба не дает правильного представления о химической стойкости нитрогликоля вследствие его высокой летучести. Для проверки стойкости нитрогликоля правильнее пользоваться пробой на образование бурых паров, согласно которой испытуемое вещество считается стойким, если при температуре 75° в течение 48 час. не будет заметно выделения окислов азота (определяемых по бурой окраске).

Смеси нитрогликоля с нитроглицерином выдерживают с иодокрахмальной бумажкой в течение 16—18 минут.

Чувствительность нитрогликоля к механическим и тепловым воздействиям несколько ниже, чем у нитроглицерина. Нитрогликоль взрывается при падении груза весом 2 *кг* с высоты 20—25 *см*. Нитрогликоль в небольшом количестве горит спокойнее, чем нитроглицерин. При быстром нагревании до 215° он вспыхивает и горит с потрескиванием. Небольшой перегрев обычно вызывает взрыв.

Восприимчивость нитрогликоля к взрыву другого взрывчатого вещества высокая; он детонирует от взрыва примерно 0,3 *г* гремучей ртути.

Взрывчатые свойства нитрогликоля превосходят взрывчатые свойства нитроглицерина. Теплота взрыва 1 *кг* нитрогликоля 1700 *ккал* (при воде жидкой). Скорость детонации нитрогликоля, определенная в стальной трубе с внутренним диаметром 51 *мм* и толщиной стенки 3 *мм*, при инициировании капсюлем-детонатором № 8 равна 7900 *м/сек*. Работоспособность нитрогликоля по стандартной пробе в свинцовой бомбе составляет около 600 *см*^{3}.

Физиологическое действие нитрогликоля на человека аналогично действию нитроглицерина. Но так как у нитрогликоля летучесть выше, чем у нитроглицерина, то и действует он на человека быстрее.

Производство нитрогликоля. Нитрогликоль можно получить нитрацией гликоля, этилена или окиси этилена. Иногда нитруют смесь гликоля и глицерина, получая смесь нитрогликоля и нитроглицерина. Технологические процессы и применяемая аппаратура для производства нитрогликоля сходны с технологическими процессами и аппаратурой, используемой в производстве нитроглицерина.

НИТРОДИГЛИКОЛЬ

Нитродигликоль $OC_4H_8(ONO_2)_2$, точнее называемый диэтиленгликольдинитратом, представляет собой бесцветную жидкость, почти не имеющую запаха, с удельным весом 1,39 и температурой затвердевания —11,3°. Эвтектическая смесь нитродигликоля с нитроглицерином в соотношении 40/60 имеет температуру замерзания —19,5°.

Летучесть у нитродигликоля больше, чем у нитроглицерина, но значительно меньше, чем у нитрогликоля. Взрывчатые характеристики и чувствительность у него ниже, чем у нитроглицерина и нитрогликоля.

Нитродигликоль используют в качестве компонента выпускаемых у нас труднозамерзающих динамитов. Смеси нитроглицерина с нитродигликолем получают совместной нитрацией смеси глицерина с диэтиленгликолем.

ТЭН (ТЕТРАНИТРОПЕНТАЭРИТРИТ)

Тэн, или тетранитропентаэритрит $C(CH_2ONO_2)_4$, получил распространение сравнительно недавно, после первой мировой войны.

Тэн—белое кристаллическое нерастворимое в воде вещество с удельным весом 1,728. Температура плавления его 141°.

Тэн химически стойкое вещество и поэтому в отличие от нитрогликоля и нитроглицерина он не требует постоянного контроля за стойкостью при хранении. Заметное разложение тэна начинается при температуре выше температуры его плавления. Окислы азота появляются примерно после получасовой выдержки тэна при температуре 140—145°. Воспламеняется тэн при зажигании довольно трудно и сгорает в небольших количествах спокойно. Температура вспышки тэна около 205°.

Чувствительность тэна к удару характеризуется 100% взрывов при стандартном методе определения. Максимальная высота падения груза весом 2 *кг*, от удара которого не происходит взрыва, равна 30 *см*. Так как использование взрывчатого вещества с такой высокой чувствительностью возможно не всюду, тэн выпускают не только в чистом виде, но и флегматизированным. Флегматизируют тэн парафином, церезином, динитротолуолом и другими подобными веществами. При добавлении 10% парафина чувствительность тэна снижается настолько, что груз весом 2 *кг* не вызывает взрыва при падении с высоты 60 *см*, а при добавлении 10% динитротолуола—с высоты 57 *см*.

Восприимчивость тэна к взрыву других ВВ высокая. В нефлегматизированном состоянии он способен взрываться от действия 0,01 *г* азида свинца.

Взрывчатые характеристики. Теплота взрыва тэна при воде жидкой 1480 *ккал/кг*. Работоспособность, определенная по расширению в свинцовой бомбе, при использовании песчаной забойки равна 500 *см*^{3}, а при водяной забойке — 560 *см*^{3}.

Бризантность по стандартной пробе определить нельзя, так как свинцовый столбик полностью деформируется от взрыва 50 *г* тэна. При взрыве 25 *г* тэна обжатие свинцового столбика равно 14,5 *мм*.

Скорость детонации тэна в железной трубе диаметром 25 *мм* при плотности 0,85 *г/см*^{3} равна примерно 5000 *м/сек*, а при плотности 1,62 *г/см*^{3} — 8000 *м/сек*. Критический диаметр заряда тэна, плотностью 1 *г/см*^{3} составляет около 3 *мм*.

Введение в тэн флегматизаторов снижает его взрывчатые характеристики. Однако и флегматизированный тэн является более мощным ВВ, чем многие нитросоединения. Так, при введении в тэн 10% парафина работоспособность его равна 350 $см^3$, т. е. выше, чем у пикриновой кислоты и тетрила.

Применяется тэн главным образом для снаряжения средств взрывания, например, в некоторых капсюлях-детонаторах в качестве вторичного заряда. Высокие взрывчатые характеристики и малый критический диаметр позволяют применять тэн для изготовления детонирующего шнура.

Производство тэна. Тэн получают нитрованием пентаэритрита — четырехатомного спирта, представляющего собой твердое кристаллическое вещество белого цвета. Измельченный пентаэритрит небольшими порциями вводят в крепкую азотную кислоту. Во время нитрации температура реакционной массы не должна превышать 25°. Поэтому процесс ведут при охлаждении и энергичном перемешивании. По окончании нитрации в реакционную массу вводят концентрированную серную кислоту. При этом тетранитропентаэритрит выпадает в виде мелких кристаллов, которые отфильтровывают и промывают водой, а затем растворяют в ацетоне.

При четырехкратном разбавлении водой из отфильтрованного ацетонового раствора выпадает твердый тетранитропентаэритрит.

Для получения флегматизированного тэна перед сушкой в него вводят парафин с красителем, окрашивающим флегматизированный тэн в розовый цвет.

ГЛАВА XVIII

НИТРОГЛИЦЕРИНОВЫЕ ВЗРЫВЧАТЫЕ ВЕЩЕСТВА

В соответствии с официальной терминологией в группу нитроглицериновых ВВ входят динамиты, представляющие собой желатинообразные ВВ с большим содержанием жидких нитроэфиров, и низкопроцентные нитроглицериновые ВВ, имеющие порошкообразную структуру и содержащие не более 10% жидких нитроэфиров, а также полупластичные нитроглицериновые ВВ, содержащие от 10 до 40% жидких нитроэфиров. Последнюю подгруппу нитроглицериновых взрывчатых веществ иногда называют полупластичными динамитами.

В двух последних типах нитроглицериновых ВВ нитроглицерин содержится в капельножидком или слабожелатинированном состоянии, а в динамитах только в желатинированном виде.

Для улучшения свойств нитроглицериновых ВВ, например, для понижения температуры их замерзания и уменьшения способности к старению, в их состав вводят другие нитроэфиры. Так, в нитрогли-

цериновых ВВ наряду с нитроглицерином может содержаться нитрогликоль, нитродигликоль и другие эфиры азотной кислоты. Некоторые сорта ВВ рекомендуется изготавливать только на основе указанных нитроэфиров без добавок нитроглицерина.

В настоящее время все нитроглицериновые ВВ приготавливают только на активном основании, т. е. все входящие в состав нитроглицериновых ВВ компоненты (кроме некоторых специальных добавок) участвуют в реакции взрывчатого разложения, увеличивая общее количество газообразных веществ в продуктах взрыва и повышая теплоту взрывчатого разложения.

Первоначально нитроглицериновые ВВ готовили на инертных поглотителях. В начале 60-х годов В. Ф. Петрушевский предложил применять нитроглицерин в смеси с 25% углекислого магния, обладающего хорошей поглотительной способностью. В 1866 г. Нобелем случайно было обнаружено, что хорошей поглотительной способностью по отношению к нитроглицерину обладает кизельгур (инфузорная земля). Смеси нитроглицерина с кизельгуром, названные гурдинамитами, получили довольно широкое повсеместное распространение.

На основные свойства гурдинамитов оказывало влияние то обстоятельство, что нитроглицерин находился в них в капельножидком состоянии. Поэтому он сравнительно легко вытеснялся из состава водой. В то же время взрывчатые свойства гурдинамитов во время хранения практически не изменялись. Гурдинамиты обладают высокой восприимчивостью, хорошей детонационной способностью, сравнительно низкими бризантностью и работоспособностью и высокой чувствительностью к механическим и тепловым воздействиям.

В настоящее время гурдинамиты не применяют. Однако принцип введения в составы некоторого количества нитроглицерина в капельножидком состоянии для повышения восприимчивости и улучшения детонационной способности ВВ используют при приготовлении низкопроцентных нитроглицериновых ВВ.

Открытие в 1875 г. явления желатинации нитроглицерина нитроклетчаткой дало возможность значительно понизить опасность обращения с этим мощным взрывчатым веществом и расширить область его применения. Желатинация нитроглицерина заключается в растворении в нем некоторого количества коллодионного хлопка или низкоазотного пироксилина. При этом получается коллоидный раствор, который в зависимости от содержания в нем коллодионного хлопка может быть твердым как рог или подвижным как студень.

Благодаря желатинации стало возможным получать высокомощные пластичные динамиты с большой плотностью и кислородным балансом, близким к нулевому. Нитроглицерин в желатинированных ВВ удерживается прочно и совершенно не вытесняется водой.

Помимо нитроглицерина и нитроклетчатки в состав динамитов входят окислители, горючие и взрывчатые вещества.

Динамиты по сравнению с нитроглицерином отличаются меньшей чувствительностью к механическим воздействиям. Так, гремучий студень, содержащий 92% нитроглицерина и 8% нитроклетчатки, взрывается при падении груза весом 2 *кг* с высоты 12 *см*, а нитроглицерин взрывается при падении такого же груза с высоты 4 *см*. С уменьшением содержания нитроклетчатки чувствительность динамитов к механическим воздействиям растет. Резко возрастает чувствительность к механическим воздействиям у динамитов и в полузамерзшем состоянии.

К нагреву и пламени динамиты очень чувствительны. Они сравнительно легко загораются от огнепроводного шнура и горят быстро, с шипением. Горение динамитов легко переходит в детонацию.

Восприимчивость динамитов к детонации ниже, чем у ВВ с капельножидким нитроглицерином. Практически для возбуждения взрывчатого разложения динамитов требуется капсюль-детонатор, содержащий 2 *г* гремучей ртути (или капсюль-детонатор № 8), а иногда и более мощный инициатор. Способность к передаче детонации у динамитов также ниже и для разных составов установлена техническими условиями в пределах 3—5 *см* для патронов диаметром 32 *мм*. Но практически у некоторых динамитов передача детонации составляет 10 и более *см*.

Химическая стойкость динамитов определяется химической стойкостью взятого для их приготовления нитроглицерина, а также свойствами других компонентов динамита.

Недостатком всех динамитов, затрудняющим их применение, является физическая нестойкость и изменение взрывчатых свойств при хранении. Динамиты в процессе хранения иногда эксудируют и стареют. Большую склонность к эксудации имеют динамиты, содержащие малое количество коллодионного хлопка, а также подвергавшиеся замерзанию и оттаиванию.

Для возбуждения взрывчатого разложения «постаревших» динамитов требуется значительно более мощный инициатор, чем для свежих динамитов. В большинстве случаев такие динамиты не взрываются от капсюля-детонатора № 8 и для их взрыва приходится применять промежуточный детонатор.

Бо́льшим затруднением в работе с динамитами на чистом нитроглицерине является способность их замерзать при температуре около +13°. Введением в состав нитроглицериновых ВВ диэтиленгликольдинитрата и нитрогликоля можно понизить температуру замерзания этих ВВ до —20—25°. Нитроглицериновые ВВ с добавками указанных нитроэфиров называют труднозамерзающими. При применении их следует учитывать, что нитрогликоль обладает высокой летучестью и способен испаряться из состава ВВ даже при нормальных условиях хранения. Естественно, что и взрывчатые свойства ВВ при этом изменяются.

Практическое значение в настоящее время имеет 62-процентный труднозамерзающий динамит. Кроме указанного динамита, техническими условиями предусмотрены 93, 83 и 72-процентные, а также

полупластичный 35-процентный динамиты. Однако последние четыре динамита в настоящее время у нас не применяются.

Основными преимуществами динамитов являются их высокая плотность, сравнительно большая работоспособность, водоустойчивость и пластичность, позволяющая максимально заполнять объем шпура и значительно повышать плотность заряжания.

Недостатками динамитов являются их пониженная химическая стойкость, старение и потеря восприимчивости в процессе хранения, опасность в обращении и вредное физиологическое воздействие на людей, непосредственно работающих с динамитами.

В связи со значительным развитием у нас производства таких аммиачно-селитренных ВВ, которые обладают водоустойчивостью, высокой мощностью и большой плотностью, в настоящее время преимуществом динамитов перед аммонитами является только их пластичность, благодаря которой в некоторых условиях эффективность взрывных работ может быть заметно повышена.

В настоящее время широкое применение получают низкопроцентные нитроглицериновые ВВ типа донаритов и победиты.

Введение небольших количеств нитроглицерина или других нитроэфиров в состав промышленных ВВ дает возможность сделать их высоковосприимчивыми к инициированию капсюлем-детонатором и детонационноспособными даже при содержании большого количества инертных добавок.

Разработано несколько составов победитов для шахт, опасных по газу и пыли (табл. 29), которые различаются между собой по содержанию нитроглицерина и инертной добавки и соответственно имеют различные мощности. Низкопроцентные нитроглицериновые ВВ наряду с нитроглицерином содержат обычно и нитросоединения (тринитротолуол), что благоприятно влияет на их физические и взрывчатые свойства.

Для повышения безопасности взрывных работ в угольных шахтах ВВ типа победитов иногда применяют в специальных предохранительных оболочках из хлористого калия (рис. 70). Кроме того, иногда применяют так называемые активные предохранительные оболочки, содержащие около 10% нитроглицерина, 10—12% аммиачной селитры, около 3% древесной муки и 75—78% инертных пламегасящих добавок.

Способы повышения восприимчивости к детонации и детонационной способности составов путем введения нитроглицерина был применен и при разработке безопасных ВВ для серных рудников. Составы ВВ для серных рудников (табл. 29) наряду с большим содержанием хлористого аммония имеют некоторое количество нитроглицерина.

По условиям хранения, перевозки и применения низкопроцентные нитроглицериновые ВВ приравнены к аммиачно-селитренным взрывчатым веществам.

Химическую стойкость нитроглицериновых ВВ контролируют на местах использования в конце гарантийного срока и каждый раз,

Таблица 29

Основные характеристики некоторых нитроглицериновых ВВ

Наименование ВВ	Кислородный баланс, %	Плотность, $г/см^3$	Теплота взрыва при постоянном объеме и воде газообразной, *ккал/кг*	Объем газов, *л/кг*	Бризантность, *мм*	Работоспособность, $см^3$	Передача детонации между патронами диаметром 32–34 *мм*, *см*	
							сухими	после часовой выдержки в воде
62-процентный труднозамерзающий динамит . .	−0,96	1,45	1269	586	15–18	360–370	5–15	5–15
Предохранительный природный победит П-6 . .	−0,14	1,0—1,10	873	760	13–16	285—300	5–15	Неводоустойчив
Предохранительный породно-угольный победит ПУ-2	−0,53	1,0—1,10	800	700	11–13	250–270	5–12	Неводоустойчив
Победит для применения в инертных оболочках П-8	−0,6	1,0—1,1	875	760	14–16	285–300	4—5	Неводоустойчив
Водоустойчивый породно-угольный победит ВП-1	+0,51	1,1—1,3	813	716	13–14	265–290	6–15	5—10
Водоустойчивый породный победит ВП-2	+0,3	1,1—1,3	910	788	14–18	320–330	6–18	5–11
Серный № 1	−0,8	0,95—1,05	720	627	10–11	200—220	5—8	Неводоустойчив
Нефтяной № 1	−0,27	0,95—1,05	634	563	9,5–10	200—210	5—7	Неводоустойчив

когда возникает сомнение в их стойкости. Наличие или отсутствие следов эксудации нужно проверять у каждой партии ВВ, выдаваемой со склада для использования.

Учитывая способность динамитов к старению и потере в процессе хранения взрывчатых свойств, необходимо периодически проверять способность их к передаче детонации.

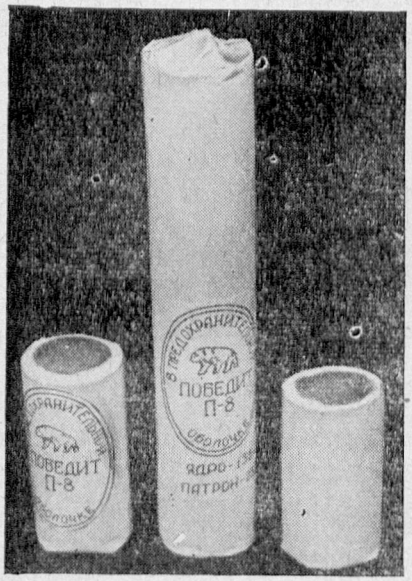


Рис. 70. Патроны победита в предохранительных оболочках

Труднозамерзающие динамиты проверяют на передачу детонации в тех же температурных условиях, в которых их хранят и применяют (но не ниже температуры замерзания). Помещения для хранения нитроглицериновых ВВ приспосабливают так, чтобы температура в них не опускалась до температуры замерзания хранящегося ВВ. При низких температурах наружного воздуха нитроглицериновые ВВ доставляют к местам работ в специальных ящиках термосах.

Производство нитроглицериновых взрывчатых веществ. Основной и наиболее ответственной операцией в производстве желатинированных нитроглицериновых взрывчатых веществ является операция желатинации нитроглицерина. От качества полученной желатины зависят как физико-химические, так и взрывчатые свойства этой группы ВВ.

В нитроглицерин или смесь его с другими нитроэфирами вводят определенное количество коллодионного хлопка. Процесс желатинации происходит при комнатной температуре при интенсивном механическом перемешивании компонентов или при повышенной температуре. В последнем случае температуру повышают, подавая горячую воду в рубашку аппарата, и выдерживают желатинирующуюся массу, в зависимости от принятого режима работы, при температуре от 45 до 72° в течение 25—45 мин. После такой выдержки массу тщательно перемешивают в течение 20—60 мин. до окончательного завершения процесса желатинации.

В желатинированную массу вносят требуемые добавки и тщательно перемешивают в течение 15—30 мин. в механическом мешателе с вертикальным или горизонтальным расположением мешалок (рис. 71 и 72) при комнатной температуре.

Операции приготовления динамитов взрывоопасны и поэтому их выполняют в отдельных обвалованных зданиях, по возможности в отсутствии людей в рабочем помещении. Включение и выключение аппаратов производится на расстоянии. Последнее время, благодаря внедрению в промышленность радио- и телевизионных устройств, появилась возможность проводить желатинацию и смешивание динамитов в механических мешателях, наблюдая за течением процессов и регулируя их из удаленных на безопасное расстояние помещений.

Составы с небольшим количеством нитроглицерина готовят следующим образом. Вначале тщательно смешивают все твердые ком-

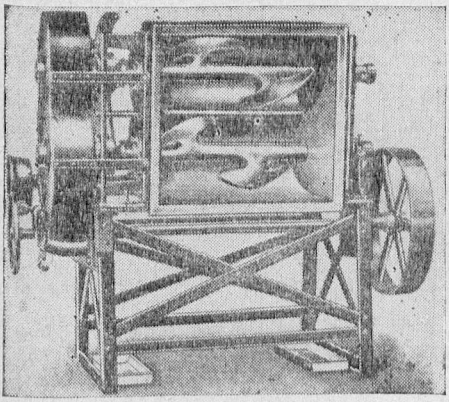


Рис. 71. Мешатель с горизонтально расположенными лопастями

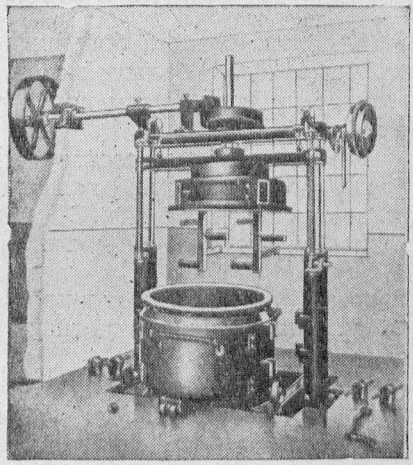


Рис. 72. Мешатель с вертикально расположенными лопастями

поненты, а затем в мешателе к смеси добавляют нитроглицерин и всю массу при подогреве или без подогрева подвергают дополнительной обработке (смешиванию).

Патронируют динамиты и порошкообразные нитроглицериновые ВВ обычно в пергаментную бумагу на специальных патронировочных шнекаппаратах. В настоящее время динамит выпускают в патронах диаметром 32, 36, 40 и даже 45 *мм*. Готовые патроны упаковывают в пачки и укладывают в ящики. Вес ящиков с патронами динамитов не должен превышать 30 *кг*.

ГЛАВА XIX

БЕЗДЫМНЫЕ ПОРОХА

Бездымные пороха, как и взрывчатые вещества, способны к горению и детонации.

Обычно бездымные пороха используют в военном деле для стрельбы из ствольного оружия, а также в ракетной технике. В этом

случае пороха, сгорая, превращаются в нагретые до высокой температуры газообразные продукты, которые в процессе расширения производят работу по метанию снаряда или пули из ствола либо являются источником реактивной силы, приводящей в движение реактивный снаряд.

При взрывных работах используется способность бездымных порохов детонировать от взрыва заряда ВВ. Для взрывных работ применяют только те бездымные пороха, у которых какие-либо свойства не отвечают требованиям соответствующих стандартов и, следовательно, не могут быть использованы по прямому назначению.

СОСТАВ И ВИДЫ БЕЗДЫМНЫХ ПОРОХОВ

В основе состава большинства бездымных порохов лежит высокобризантное, с большой скоростью детонации и очень чувствительное ко всем видам воздействия взрывчатое вещество — пироксилин.

По химическому составу пироксилин представляет собой нитрованную клетчатку. В зависимости от режима нитрации клетчатки, условно обозначаемой $(C_6H_{10}O_5)_4$ или $C_{24}H_{20}(OH)_{20}$, может происходить замещение большего или меньшего количества гидроксильных групп (ОН) в молекуле клетчатки нитратными группами ONO_2. Таким путем получают пироксилин нескольких степеней нитрации, характеризуемых процентным содержанием азота в готовом продукте.

Для производства порохов применяют главным образом пироксилины, содержащие от 12 до 13,35% азота.

При взрыве пироксилина, содержащего около 12% азота, выделяется приблизительно 1000 *ккал/кг* тепла, при этом развивается температура до 3100° и образуется около 900 *л/кг* газообразных продуктов разложения. Скорость детонации пироксилина при плотности 1,3 *г/см*^{3} достигает 6300 *м/сек*. Работоспособность 370—380 *см*^{3}, бризантность (при испытании на свинцовых столбиках) около 14 *мм*.

В процессе изготовления бездымных порохов пироксилин превращается в вещество, способное к быстрому и устойчивому, даже при высоких давлениях (до 3000 *кг/см*^{2}), сгоранию без перехода в детонацию. Такое изменение свойств пироксилина достигается изменением его физического состояния. При обработке пироксилина некоторыми растворителями (желатинация) он, не изменяя своих химических свойств, частично теряет волокнистую структуру и превращается в вязкую массу, представляющую собой коллоидный раствор. Желатинацией можно повысить плотность пироксилина от 0,1 (плотность пироксилиновой мезги) до 1,6 *г/см*^{3}.

Сухой пироксилин легко воспламеняется искрой и сгорает чрезвычайно быстро. При достаточно большой массе пироксилина горение может перейти в детонацию. Желатинированный пироксилин, даже в замкнутом пространстве, сгорает без перехода в детонацию. Сухой пироксилин легко детонирует от взрыва детонатора, содер-

жащего 0,25 *г* гремучей ртути. В то же время у очень небольшого количества марок мелкозерненых бездымных пироксилиновых порохов удается вызвать детонацию при инициировании капсюлем-детонатором № 8.

Растворители, входящие в состав пороха и вызывающие указанное изменение свойств пироксилина, обычно делят на три группы:

а) летучие растворители — спирто-эфирная смесь, ацетон и другие вещества, которые после желатинации пироксилина почти полностью удаляются из него;

б) труднолетучие растворители — нитроглицерин, динитрогликоль, нитрогуанидин и др., практически полностью остающиеся в составе пороха;

в) нелетучие растворители — например, ди- и тринитросоединения, полностью входящие в состав пороха.

Эти растворители можно применять для приготовления пороха каждый в отдельности или совместно в разных соотношениях.

Кроме пироксилина и растворителей, в состав порохов входят в небольшом количестве вещества, придающие им некоторые специальные свойства. Для повышения химической стойкости пороха и сохранения постоянства его химического состава вводят так называемые стабилизаторы. В качестве стабилизаторов применяют дифениламин [$(C_6H_5)_2NH$], централиты [производные мочевины, например $(C_6H_5C_2H_5)_2\ N_2CO$] и другие вещества, способные химически связывать выделяющиеся при разложении порохов окислы азота. В то же время стабилизаторы сами не вступают в химическое взаимодействие с составными частями пороха.

В целях увеличения скорости горения некоторых сортов порохов массу их делают по возможности более пористой. Пористость массы пороховых зерен достигают введением в желатинированную нитроклетчатку растворимых солей, например калиевой селитры, которые в процессе изготовления пороха вымываются, оставляя в зернах незаполненные пустоты—поры.

По химическому составу пороха делят на следующие группы:

1) пироксилиновые пороха, изготовляемые на летучем растворителе;

2) нитроглицериновые пороха, в которых веществом, желатинирующим пироксилин, служит нитроглицерин. Нитроглицериновые пороха в свою очередь разделяют на так называемые баллиститы, изготовляемые из более низкоазотного пироксилина, но содержащие большое количество нитроглицерина, и кордиты, изготовляемые из высокоазотного пироксилина;

3) дигликолиевые пороха, содержащие вместо нитроглицерина нитрогликоль.

Меньшее распространение имеют пороха нитрогуанидиновые и пороха, содержащие ди- и тринитросоединения ароматического ряда.

Все эти весьма различные по химическому составу пороха изготовляют в виде зерен или других пороховых элементов самой раз-

личной величины и формы. По форме пороховые элементы могут быть цилиндрические, ленточные, пластинчатые, прямоугольные, круглые и кольцеобразные (рис. 73 и 74). Размеры отдельных элементов составляют от десятых долей миллиметра до нескольких сантиметров в сечении и до метра по длине. Кроме того, для создания определенных условий горения элементы некоторых сортов пороха делают не сплошными, а с отверстиями—каналами, различными по диаметру. Диаметр каналов может быть от сотых долей миллиметра и до нескольких (2—3) сантиметров. Толщина стенки у трубчатых порохов, толщина пластинки у пластинчатых, расстояние между каналами элементов порохов называется толщиной горящего свода. Пороха в виде небольших цилиндриков, прямоугольников и пластинок, обладающие сыпучестью, принято называть зерненными. Каждая разновидность пороха имеет свою марку.

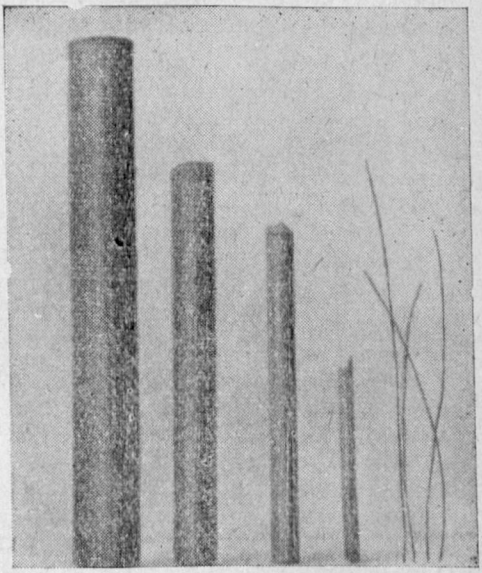


Рис. 73. Трубчатый пироксилиновый порох

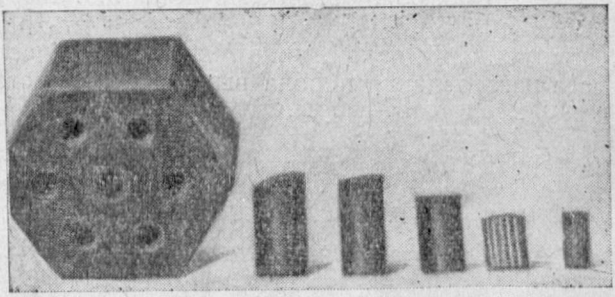


Рис. 74. Формы элементов зерненого пироксилинового пороха

Понятия об обозначении порохов. Некоторые пороха до настоящего времени сохранили обозначения, присвоенные им ранее по начальным буквам названия орудия или оружия, для которого они предназначались. Например, марка «ВТ» обозначает «винтовочные под тяжелую пулю», а марка «ВЛ» «винтовочные под легкую пулю». Все винтовочные пороха мелкие, размеры отдельных зерен измеряются миллиметрами и долями миллиметра.

Марки зерненых порохов обычно обозначают дробью, числитель которой показывает толщину горящего свода в десятых долях миллиметра, а знамена-

тель—число каналов в зерне. Например, порох марки 7/7 означает, что толщина горящего свода зерна 0.7 *мм*, а число каналов в зерне равно 7. Также расшифровываются названия 4/1, 7/1, 9/7, 12/7, 14/7 и 15/7.

Обозначение трубчатых пироксилиновых порохов аналогично обозначению зерненых порохов, но к дроби приписывают начальные буквы слова трубка, например 10/1 Тр (трубка с толщиной свода 1 *мм*). В обозначениях трубчатых нитроглицериновых порохов буквы «Тр» не приписывают, а ставят букву «Н» (нитроглицериновый) 10/1 Н (трубчатый нитроглицериновый с толщиной горящего свода 1 *мм*). Пластинчатые пороха обозначают буквами «Пл» и двумя числами, написанными через тире, первое из которых обозначает толщину пластинки в сотых долях миллиметра и второе — ширину пластинки в десятых долях миллиметра (Пл. 2—20). Некоторые трубчатые пороха обозначаются в соответствии с характеристиками орудия, для которого они предназначены. Например, дробь 75/50 показывает, что это порох, предназначенный к применению в 75-миллиметровой пушке с длиной нарезной части ствола орудия 50 калибров.

Приведенные общепринятые обозначения отдельных марок порохов позволяют судить в основном о природе пороха (пироксилиновый, нитроглицериновый и т. д.) и о размерах пороховых элементов. Однако одинаковые пороховые элементы могут быть изготовлены из пороховой массы различного состава, иметь различную пористость, а также графитованную (покрытую графитом) или не графитованную поверхность. Все эти различия в большей или меньшей степени сказываются на восприимчивости порохов, способности их к детонации и взрывчатых характеристиках.

СВОЙСТВА БЕЗДЫМНЫХ ПОРОХОВ

Стойкость порохов. Основные составные части порохов, а именно пироксилин и нитроглицерин или нитрогликоль, способны при длительном хранении терять химическую стойкость. Реакция разложения порохов протекает с выделением тепла. Если реакция разложения протекает в большой массе пороха, то повышение температуры может привести к вспышке пороха, которая в свою очередь при благоприятных условиях приведет к взрыву.

Для уменьшения возможности разложения порохов при хранении необходимо избегать повышенных температур и предохранять пороха от воздействия солнечных лучей. При хранении порохов в негерметической укупорке следует как можно чаще проветривать складские помещения.

При применении порохов на взрывных работах существенное значение могут иметь лишь такие характеристики их физической стойкости, как эксудация и состояние поверхности пороховых элементов. Обнаружить эксудацию можно простым осмотром внутренней поверхности тары и поверхности пороховых элементов. Пороха с эксудатом нитроглицерина уничтожают. Перед переноской к местам уничтожения эксудирующие пороха обильно поливают водой.

Появление на поверхности пороховых элементов углублений, вздутий и рыхлости часто свидетельствует об опасном нарушении их химической стойкости. Длительное хранение таких порохов не допускается.

Чувствительность к удару. Бездымные пороха значительно менее чувствительны к удару, чем основные активные компоненты, входящие в их состав:

Наименование вещества	Чувствительность к удару, выраженная в *см* высоты падения груза весом 2 *кг*
Нитроглицерин	4
Нитрогликоль	20
Пироксилин	20
Тринитротолуол	100
Нитроглицериновый порох с 40% нитроглицерина	30
Нитрогликолевый порох	60
Тринитротолуоловый порох . . .	130
Порох с 23% нитроглицерина и 5% вазелина	110

Вследствие различия рецептур порохов, применяемых в отдельных странах, а также отсутствия полной тождественности в методах испытания, в литературе по-разному оценивается их чувствительность к удару. Во французской литературе имеются утверждения, что бездымные пороха значительно менее чувствительны к удару, чем допущенные к промышленному применению взрывчатые вещества, и могут быть отнесены к категории неопасных. В немецкой литературе большинство авторов указывает на довольно высокую чувствительность бездымных порохов и относит их к категории веществ, весьма опасных в обращении. В практике отмечены случаи загорания тяжелых ящиков с порохами при их падении, прострелe пулей и других ударных нагрузках. Это указывает на необходимость очень осторожного обращения с порохами.

Чувствительность к трению бездымных порохов находится в зависимости от содержания высокочувствительных составных частей и флегматизаторов в их массе. Порох становится особенно чувствительным к трению при засорении его песком, металлическими стружками и другими твердыми примесями.

Мелкозернистые пороха легко загораются при воздействии на них пламени или искр.

Электризация порохов. По электрическим свойствам бездымные пороха относятся к классу диэлектриков. Поэтому при трении пороховых элементов друг о друга или о тела, не проводящие электричества, они электризуются. Степень электризации бездымных порохов зависит от состава пороха и внешних условий.

С увеличением в составе пороха нитроглицерина степень электризации резко падает. При перемешивании нитроцеллюлозного пороха измеренный потенциал статического электричества оказался больше 3200 *в*, при перемешивании пороха с малым содержанием нитроглицерина —только 310 *в*, а при перемешивании пороха, содержащего 40% нитроглицерина, электризации не наблюдалось. Такие вещества как парафин и воск снижают способность бездымных порохов к электризации, а дифениламин и камфора повышают. Пороха с хорошо графитованной поверхностью не электризуются потому, что графит делает поверхность пороховых элементов токопроводящей.

Резко снижает способность бездымных порохов к электризации повышенная влажность воздуха. При относительной влажности воздуха выше 65% электризация порохов незначительна. Однако при

повышенных температурах относительная влажность воздуха мало влияет на степень электризации. Уже при 30° относительная влажность воздуха практически не сказывается на степени электризации.

При работе с порохами во избежание их электризации все приспособления и сами пороха следует смачивать водой, а также обеспечивать отвод статического электричества на случай его накапливания в отдельных частях заряда.

Энергии искрового разряда при электризации порохов обычно недостаточно, чтобы воспламенить пороховое зерно. Но при проскакивании искры, например в зарядной камере, не исключена возможность вспышки паров летучих растворителей, которые могут передать воспламенение пороховому зерну.

Взрывчатые характеристики порохов. Вопрос об использовании бездымных порохов на взрывных работах был поставлен еще после первой мировой войны, когда скопилось значительное количество трофейных и отечественных порохов, изготовленных в военное время и непригодных для длительного хранения. Однако в то время применение порохов еще не получило производственного значения и их использовали только для опытов, проводимых главным образом под руководством проф. Сухаревского.

Следует учитывать, что в указанный период применения больших зарядов (для камер и скважин) не имело широкого распространения. Поэтому все применявшиеся на взрывных работах взрывчатые вещества должны были надежно детонировать в зарядах сравнительно небольшого диаметра. Основной вывод, который был сделан из опытных работ периода двадцатых годов—это необходимость измельчать бездымные пороха перед их употреблением.

Позднее, в связи с развитием взрывного дела и исследованиями в области теории взрывчатых веществ, стало возможным сравнительно широкое использование бездымных порохов. Особенно широкое производственное применение во взрывном деле нашли бездымные пороха после Великой Отечественной войны.

Как уже было указано, только самые мелкие из зерненых порохов способны взрываться от капсюля-детонатора № 8. В основном к этой категории следует отнести винтовочные пороха. Для взрыва почти всех остальных порохов требуется применение промежуточного детонатора.

Опытные данные, приведенные в табл. 30, показывают целесообразность применения в качестве промежуточного детонатора мощных ВВ с высокой скоростью разложения.

Детонационная способность бездымных порохов зависит от их состава, пористости пороховой массы, размеров пороховых элементов, графитовки их поверхности, а также от условий взрывания. Возбудить детонацию у пироксилиновых порохов легче, чем у нитроглицериновых. Незатухающую детонацию у некоторых сортов нитроглицериновых порохов получить не удается даже при применении очень больших промежуточных детонаторов из мощных ВВ. Во всех случаях детонационная способность выше у порохов пористых и с меньшими размерами пороховых элементов. Имеет значение и фор-

ма пороховых элементов. Ленточные и пластинчатые пороха взрываются легче, чем трубчатые.

Проверка влияния расположения инициатора на взрывчатые характеристики бездымного пороха показала, что при расположении промежуточного детонатора на боковой поверхности пороховых элементов последние взрываются легче, чем при расположении на торцовой. Это обстоятельство следует учитывать при размещении в камерах основного порохового заряда из крупных пороховых элементов и промежуточных детонаторов (боевиков).

Таблица 30

Влияние способа инициирования на бризантность бездымных порохов

Характеристика пороха	Бризантность по пробе на свинцовых цилиндриках при насыпной плотности, *мм*, при инициировании			
	КД № 8	КД № 8 и 3 *г* тетрила	КД № 8 и 8 *г* тетрила	КД № 8 и 20 *г* тетрила
Крупнозернистый пироксилиновый . . .	0	0,7	3,7	3,8
Среднезернистый пироксилиновый	0	2,1	4,6	5,5
Мелкозернистый семиканальный пироксилиновый	0	4,2	6,7	9,3
Винтовочный	4,3	9,0	13,3	13 4

Прочная оболочка улучшает условия детонации бездымных порохов. Низкая бризантность винтовочного пороха при определении по стандартной пробе (4,3 *мм*) свидетельствует о неполной детонации заряда. При заключении навески пороха в железное кольцо с толщиной стенок около 3,5 *мм*, обжатие свинцовых столбиков получается равным 30,5 *мм*. Такой эффект взрыва следует объяснить не только изменением формы работы взрыва (проявление фугасного действия наряду с бризантным), но и более полной детонацией пороха в оболочке.

Скорость детонации бездымных порохов, измеренная для зарядов без прочных оболочек, колеблется в очень широких пределах— от 3500 до 8000 *м/сек*.

Для взрывных работ обычно рекомендуют использовать бездымные пороха в обводненных забоях. Вследствие большой плотности зерна пороха тонут в воде, в результате чего облегчается процесс заряжания обводненных скважин. Кроме того, многие пороха, например, пироксилиновые, хорошо детонируют в воде. Это объясняется, по-видимому, тем, что вода способствует распространению ударной волны по заряду, а наличие газовых включений в пороховых элементах обеспечивает возникновение горячих очагов воспламенения пороха при адиабатическом сжатии газа в этих включениях.

Но не все пороха одинаково хорошо взрываются в воде. Нитроглицериновые пороха в воде взрываются труднее, и детонация их часто затухает.

Предполагается, что различное влияние воды на детонационную способность пироксилиновых и нитроглицериновых порохов связано с различием в структуре пороховой массы. Наличие внутренних микропор в пироксилиновых порохах обеспечивает возможность возникновения очагов воспламенения в результате сжатия газовых включений в микропорах. Окружение зерен пороха водой в этом случае может оказаться полезным. В случае применения нитроглицериновых порохов, в структуре которых нет микропор, вытеснение водой воздуха из зарядов приводит к уменьшению образования очагов воспламенения при прохождении ударной волны и, следовательно, приводит к ухудшению детонации. Вытеснение пузырьков воздуха при замачивании зарядов из нитроглицериновых порохов происходит, по-видимому, не сразу и поэтому потеря детонационной способности у зарядов таких порохов происходит в течение некоторого времени.

Вопрос о детонационной способности бездымных порохов и необходимом промежуточном детонаторе для взрыва заряда пороха обычно решается опытным путем отдельно для каждой марки пороха или смеси их. Пороха, предназначенные для взрывов в шпурах, должны надежно детонировать в открытых зарядах соответствующих диаметров от капсюля-детонатора № 8 или небольшого промежуточного детонатора. Для применения в глубоких скважинах можно рекомендовать те пороха, которые полностью детонируют в открытых зарядах диаметром 100—200 *мм* и длиной 2—3 *м*. Пороха, предназначенные для всех других видов открытых работ, испытывают взрыванием в грунте. В зависимости от предполагаемых условий применения пороха испытывают в сухих или обводненных шурфах. Результаты взрыва сравнивают с результатами взрыва, равного по весу заряда стандартного взрывчатого вещества.

Переводные коэффициенты, характеризующие работоспособность бездымных порохов в условиях их использования для различных марок порохов колеблются в пределах 0,80—1,20 при определении их по отношению к аммониту № 9, принятому за единицу.

ГЛАВА XX

ХЛОРАТНЫЕ И ПЕРХЛОРАТНЫЕ ВЗРЫВЧАТЫЕ ВЕЩЕСТВА

Хлоратные и перхлоратные взрывчатые вещества представляют собой смеси окислителей и горючих веществ с различными добавками. В качестве окислителей используют хлораты или перхлораты щелочных металлов или перхлорат аммония.

Хлоратные и перхлоратные вещества в нашей стране в настоящее время не применяются. Однако в некоторых зарубежных странах перхлоратные ВВ имеют довольно широкое применение (карлиты в Японии).

Основными препятствиями на пути к широкому внедрению хлоратных ВВ являются сравнительно большая чувствительность их к механическим воздействиям и затруднения в создании простой, безопасной и эффективной технологии производства их.

Перхлоратные ВВ менее опасны в обращении, они мало гигроскопичны и в их состав вследствие высокого кислородного баланса перхлоратов можно ввести большее количество горючих веществ, чем в аммониты. В связи с этим продолжается разработка составов промышленных ВВ, содержащих перхлораты.

Ниже приведены некоторые характеристики основного сырья хлоратных и перхлоратных ВВ, знакомство с которыми необходимо для того, чтобы можно было правильно подойти к решению вопроса об использовании этих взрывчатых веществ.

ХЛОРАТЫ И ХЛОРАТНЫЕ ВЗРЫВЧАТЫЕ ВЕЩЕСТВА

Окислителем и главной составной частью хлоратных ВВ служит хлорноватокислый калий $KClO_3$ или хлорноватокислый натрий $NaClO_3$, называемые хлоратами.

Хлорат калия (бертолетовая соль)—белое кристаллическое вещество, мало гигроскопичное и плохо растворимое в воде.

С различными солями аммония, и в частности с аммиачной селитрой, хлораты калия и других металлов образуют способный к самовоспламенению, легко взрывающийся хлорат аммония. В присутствии влаги реакция образования хлората аммония ускоряется. Следовательно, совместное хранение, перевозка и применение хлоратных и аммиачно-селитренных веществ недопустимы. Хлорат калия в больших дозах ядовит. Попадая внутрь или на кожу и слизистые оболочки человека, он вызывает язвы и отеки. Хлорат натрия отличается от хлората калия большей растворимостью в воде и гигроскопичностью.

Как хлорат калия, так и хлорат натрия в чистом виде не чувствительны к механическим воздействиям. Однако при самом незначительном загрязнении их горючими веществами они становятся чувствительными и опасными в обращении. Особенно сильно повышается чувствительность хлоратов при высоких температурах. Известны случаи взрывов хлоратов, находившихся в деревянной таре во время пожаров. В чистом виде хлораты калия и натрия практически не восприимчивы к взрыву другого ВВ.

Смеси хлоратов раньше приготовляли только с органическими горючими веществами, обладающими пластичностью (воск, парафин, вазелин) и благодаря этому менее опасными в производстве хлоратных составов, чем твердые непластичные горючие вещества. Позднее для повышения мощности и работоспособности хлоратных ВВ в их состав стали включать нитроглицерин, нитросоединения и нитрованные углеводороды с низкой точкой плавления, а также металлы (в основном алюминий). Находили применение хлоратные ВВ на основе жидких горючих компонентов (бензол, нитробензол и т. п.), которыми пропитывали заряды из прессованного хлората калия (так называемые составы Шпренгеля).

Взрывчатые свойства хлоратных ВВ зависят от их состава и способа приготовления. В целом можно отметить, что по чувствительности к механическим воздействиям они занимают промежуточное положение между динамитами и аммиачно-селитренными ВВ. Температура вспышки хлоратных ВВ находится в пределах 200—250°. К пламени хлоратные ВВ мало чувствительны; как правило, от луча огня огнепроводного шнура они не загораются. В случае загорания хлоратных ВВ на воздухе они обычно сгорают без взрыва, а в замкнутом пространстве могут дать взрыв.

Хлоратные ВВ при взрыве дают более высокую температуру, чем аммониты, но значительно меньше газообразных продуктов. Работоспособность хлоратных ВВ, определенная в свинцовой бомбе, составляет примерно 70—80% работоспособности аналогичных аммонитов и находится в пределах 180—290 $см^3$. По бризантности хлоратные ВВ не уступают аммонитам.

Скорость детонации у большинства хлоратных ВВ ниже, чем у аммонитов. Значительно уступают они аммонитам по способности к передаче детонации. Ввиду этого некоторые хлоратные ВВ не применяют в удлиненных зарядах небольшого диаметра, например, при мелкошпуровом методе ведения взрывных работ.

ПЕРХЛОРАТЫ И ПЕРХЛОРАТНЫЕ ВВ

Перхлорат калия ($KClO_4$) по внешнему виду представляет бесцветные кристаллы ромбической формы. Удельный вес его—2,54. Растворимость перхлората калия в воде при нормальной температуре незначительна, но с повышением тем-

пературы растет. При 20° в 100 *г* воды растворяется 1,8 *г*, а при 100° — 21 *г* перхлората калия. Гигроскопичность перхлората калия ниже гигроскопичности хлората калия. По химической стойкости как при нормальных, так и при высоких температурах перхлорат калия превосходит хлорат калия. Частичное его разложение начинается при температуре выше 300°. Резко снижается химическая стойкость перхлората калия при попадании в него кислот.

Чистый перхлорат калия не взрывчат, так как его разложение происходит с поглощением тепла:

$$KClO_4 = KCl + 2O_2 - 0{,}14 \text{ } ккал.$$

Однако самые незначительные количества органических примесей (вследствие экзотермичности реакции окисления) делают его чувствительным и способным к взрыву.

Перхлорат аммония имеет удельный вес приблизительно 1,87. Растворимость его в воде выше, чем у перхлората калия. При 20° в 100 *г* воды растворяется 23,43 *г*, а при 100°—88,25 *г* перхлората аммония. Гигроскопичность перхлората аммония выше гигроскопичности хлората калия.

В противоположность перхлорату калия перхлорат аммония способен к взрывчатому превращению, так как его разложение происходит с выделением энергии. Чувствительность перхлората аммония к удару значительно выше чувствительности аммиачной селитры (70—80% взрывов по стандартной пробе). К лучу огня огнепроводного шнура перхлорат аммония нечувствителен.

При взрывчатом разложении 1 *кг* перхлората аммония образуется 810 *л* газообразных продуктов и выделяется 266 *ккал* тепла.

К взрыву капсюля-детонатора № 8 перхлорат аммония не чувствителен. При применении промежуточных детонаторов перхлорат аммония детонирует в патронах диаметром 6 *см*. В свинцовой бомбе он взрывается капсюлем-детонатором и дает расширение 200 $см^3$.

Обжатие свинцового цилиндрика при взрыве 50-граммового заряда перхлората аммония, заключенного в жестяную оболочку и инициированного зарядом тетрила, равно 12 *мм*. Аммиачная селитра в этих условиях дает обжатие 8 *мм*.

Примеси горючих веществ сильно повышают чувствительность, восприимчивость и взрывчатые характеристики перхлората аммония.

Влага сильно снижает детонационную способность перхлората аммония и при 10-процентном содержании перхлорат аммония полностью теряет способность к взрыву.

Взрывчатые вещества на основе перхлората калия можно разделить на две группы, различающиеся между собой по основным характеристикам. К первой группе можно отнести ВВ, содержащие в своем составе аммиачную селитру, а ко второй—не содержащие аммиачной селитры.

Введение в составы с перхлоратом калия аммиачной селитры снижает их чувствительность к механическим воздействиям и повышает работоспособность, но делает их гигроскопичными. Составы без аммиачной селитры близки по взрывчатым свойствам к хлоратным ВВ, но, как правило, уступают им по восприимчивости к взрыву другого ВВ и по детонационной способности.

Составы с перхлоратом аммония отличаются более высокой восприимчивостью и работоспособностью. Высокая работоспособность таких ВВ объясняется наличием большого количества газообразных веществ и отсутствием твердого остатка в продуктах взрыва. Отрицательным свойством промышленных составов с перхлоратом аммония является наличие в продуктах взрыва газообразного хлористого водорода (HCl), отравляющего атмосферу.

Склонность составов с перхлоратом аммония к слеживанию вызывает у них более быстрое изменение взрывчатых свойств в период хранения, чем у составов с перхлоратом калия.

Как восприимчивость к детонации, так и взрывчатые характеристики перхлоратных ВВ возрастают с увеличением количества вводимых в их состав взрывчатых компонентов.

Приготовление хлоратных и перхлоратных ВВ производят путем ручного перемешивания компонентов или путем обработки их в механических мешателях. Для механического перемешивания применяют мешатели, сходные или тождественные смесителям, используемым в производстве динамитов. Процессу сме-

шивания предшествует раздельная подготовка составных частей смесей: сушка, измельчение, просеивание и дозировка. Готовая смесь иногда поступает на вальцевание (при ручном перемешивании или зернении), а затем просеивание и патронирование.

ГЛАВА XXI

ПАТРОНЫ КАРДОКС И ГИДРОКС

В целях снижения опасности ведения взрывных работ в шахтах, особо опасных по газу и пыли, еще в 1799 г. было предложено для отбойки угля применять вместо ВВ сжатый воздух, нагнетаемый в чугунные «бомбы».

Такие «бомбы» взрывались при повышении давления сжатого воздуха нагреванием специальными горючими смесями.

Несколько позже был предложен способ взрывания, при котором металлический корпус патрона оставался целым и мог быть использован для нескольких взрывов.

В качестве вещества, создающего при нагревании большое давление за счет расширения газов, была использована жидкая углекислота, критическая температура которой 31°.

Патроны, снаряженные жидкой углекислотой, были названы кардокс.

Патрон кардокс состоит в основном из трех частей—корпуса патрона, зарядной и разрядной головок.

Корпус патрона представляет собой полый цилиндр, изготовленный из высококачественной стали, выдерживающей давление до 12 000 *кг/см*^{2}, и служащий резервуаром для жидкой углекислоты и нагревательного состава. Зарядная головка служит для заливки жидкой углекислоты и размещения в ней контактов для подводки тока к электровоспламенителю. Она снабжена уплотняющими устройствами для изоляции электропроводящей части патрона от жидкой углекислоты. Разрядная головка служит для вывода углекислоты из патрона в шпур. Ее можно изготовлять из менее прочной стали, чем корпус патрона. Разрядная головка отделена от рабочего пространства корпуса патрона сравнительно хрупким металлическим диском, зажатым упорным кольцом и нажимным, или срезающим, кольцом. На боковой поверхности разрядной головки имеются отверстия, через которые превращенная в газ углекислота попадает в пространство шпура.

Вначале патроны «кардокс» применяли в США, затем их стали применять в Англии и некоторых других странах.

Конструкция и размеры патрона, нагревательный элемент и способы применения патрона менялись, но принцип действия сохранен до последнего времени.

У нас патроны кардокс применяли на шахтах Донбасса в первой половине тридцатых годов, а также позднее при проведении некоторых опытных работ, где большое внимание уделялось нагревательному элементу, так как хорошая его работа обусловливает надлежащий эффект взрыва. В некоторых образцах патронов кардокс в нагревательный элемент вводили вещества, дающие при температуре вспышки нагревательной смеси инертные газы, предохраняющие шахтную атмосферу от воспламенения при случайном попадании искр из нагревательного элемента.

Патроны кардокс заряжают на специальной зарядной станции, оборудованной компрессором для сжижения и перекачки углекислоты и конденсаторами-охладителями.

В СССР Харьковским угольным институтом были разработаны и применены патроны гидрокс, в которых вместо углекислоты использовали обыкновенную воду.

Для эффективного действия патронов гидрокс были подобраны диски, разрушающиеся под таким давлением, при котором вырвавшиеся в пространство шпура пары воды сохраняют температуру выше критической до момента нарушения целости стенок шпура, т. е. до возможности свободного расширения.

Замена углекислоты водой значительно упрощала зарядку и использование патронов. Объем патрона можно было уменьшить, так как каждый грамм воды способен давать примерно в 2,4 раза больший объем газов, чем один грамм углекислоты. Однако вес нагревательного элемента в патроне гидрокс больше по

сравнению с патроном кардокс. Широкого распространения патроны гидрокс не получили.

По литературным данным, применение патронов кардокс и гидрокс было эффективным только при предварительной зарубке угля и хорошей забойке шпуров, обеспечивающей создание максимального давления газов.

Максимальное давление газов, создаваемое патронами кардокс и гидрокс, невелико. Оно не превышает обычно 700 *кг/см*^{2}. Однако действие его более продолжительно, чем действие газообразных продуктов взрыва ВВ, и поэтому достаточно для откалывания подрубленного заранее угля.

Последнее время патроны типа кардокс снаряжают твердыми смесями, способными под действием теплового импульса к разложению с большим количеством газообразных продуктов. Снаряжение таких патронов проще, а эффект действия их выше.

Положительными свойствами всех указанных патронов считается безопасность их применения в шахтах со взрывоопасной атмосферой, отсутствие ядовитых газов в выработке после взрыва, возможность производить взрывы без удаления людей на большие расстояния от места взрыва и малое воздействие взрывов на кровлю. Однако по мнению ряда специалистов, применение патронов кардокс опасно, так как при некоторых дефектах патронов не исключена возможность воспламенения взрывоопасной атмосферы воспламенительным элементом.

ГЛАВА XXII

ИНИЦИИРУЮЩИЕ ВЗРЫВЧАТЫЕ ВЕЩЕСТВА

Инициирующие ВВ и их свойства

Инициирующими называют такие взрывчатые вещества, которые способны даже в малых количествах взрываться под действием одного из простейших начальных импульсов и вызывать при этом детонацию вторичных ВВ.

Способность инициирующих ВВ детонировать под действием простого начального импульса (луча огня, удара, трения, накола) определяет опасность их в применении и обусловливает особые требования к их производству. Эта же особенность инициирующих взрывчатых веществ и дала возможность использовать их для изготовления средств взрывания.

Способность инициирующих взрывчатых веществ детонировать в очень малых количествах связана с быстрым нарастанием скорости разложения их.

Процесс развития детонации у какого-либо вторичного взрывчатого вещества, например у тротила или аммонита, инициируемого капсюлем-детонатором № 8, протекает таким образом, что присущая этому ВВ скорость детонации устанавливается не в непосредственной близости от места приложения инициирующего импульса, а на довольно большом расстоянии от него. При взрыве инициирующего ВВ, например азида свинца, под воздействием на него пламени, присущая этому ВВ скорость детонации устанавливается на значительно более коротком участке, измеряемом долями миллиметра (рис. 75).

В непосредственной связи с изложенным находится очень малая

величина критического диаметра у инициирующих ВВ. У азида свинца, например, она равна 0,01—0,02 *мм*.

Иногда к характерным особенностям инициирующих взрывчатых веществ относят также эндотермический характер этих соединений (т. е. отрицательную теплоту образования их). Однако следует заметить, что к эндотермическим соединениям относятся не только инициирующие ВВ, но и многие вторичные ВВ и даже совсем не взрывчатые вещества, и наоборот, некоторые инициирующие ВВ, например гексаметилентрипероксиддиамин, являются экзотермическими соединениями.

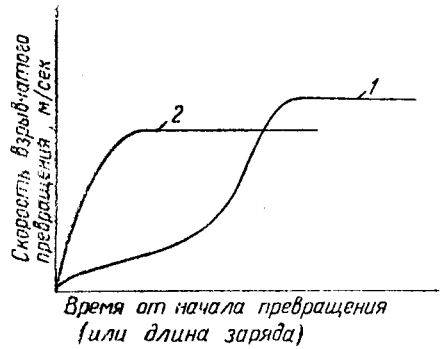


Рис. 75. Кривые нарастания скорости распространения взрывчатого превращения: *1*—вторичных; *2*—инициирующих ВВ

Инициирующая способность. Способность ВВ при взрыве вызывать детонацию других взрывчатых веществ называется инициирующей способностью.

Различные инициирующие ВВ обладают неодинаковой инициирующей способностью, которая зависит как от свойства самих ВВ, так и от условий их применения.

Для возбуждения взрыва инициирующих веществ в практике ведения взрывных работ применяется только тепловой импульс, вызывающий воспламенение ВВ с последующим переходом горения в детонацию.

Лучшей воспламеняемостью обладают инициирующие ВВ с меньшей величиной кристаллов (т. е. с более развитой поверхностью и меньшей плотностью верхнего воспламеняемого слоя).

Но даже при равных условиях чувствительность к воспламенению у различных инициирующих взрывчатых веществ не одинакова. Так, например, гремучая ртуть и тринитрорезорцинат свинца легче воспламеняются, чем азид свинца.

Переход горения в детонацию зависит от плотности инициирующего ВВ. С повышением плотности (до определенного предела) создаются лучшие условия для перехода горения в детонацию. Улучшаются также условия перехода горения в детонацию и при заключении инициирующего взрывчатого вещества в оболочку. При одинаковых условиях воспламенения способность детонировать у одних инициирующих ВВ выше, а у других—ниже. Например, если на листе картона положить одинаковые небольшие количества азида свинца и гремучей ртути и воспламенить их, то гремучая ртуть только сгорит, а азид свинца сдетонирует и пробьет в картоне отверстие.

Инициирующая способность выше у тех инициирующих ВВ, у которых период от начала воспламенения до возникновения детонации короче, а потенциальная энергия и скорость детонации больше.

Инициирующую способность определяют несколькими способами. Все их можно разделить на к о с в е н н ы е и п р я м ы е м е т о д ы.

В основу всех к о с в е н н ы х м е т о д о в положено предположение, что инициирующая способность находится в прямой зависимости от мощности, бризантного эффекта или работоспособности инициирующих взрывчатых веществ. Заключение о большей или меньшей работоспособности делают, например, из сравнения величин расширений, которые получаются в свинцовых цилиндрах высотой 100 *мм* и диаметром 100 *мм* с гнездом диаметром 7 *мм* и глубиной 55 *мм* (рис. 76) или по диаметру отверстия, полученного от взрыва инициирующего ВВ, помещенного в гильзу, вертикально установленную на свинцовой пластинке определенной толщины.

Существует и еще ряд подобных проб, основанных на измерении механического эффекта, получающегося при взрыве испытуемых инициирующих ВВ.

Однако все эти пробы не всегда правильно отражают действительную способность инициирующих веществ вызывать взрыв вторичных ВВ. Так, например, азид свинца дает 22,6 $см^3$ расширения в свинцовом цилиндре, а гремучая ртуть — 25,6 $см^3$. В то же время твердо установлено, что инициирующая способность азида свинца выше, чем у гремучей ртути.

Значительно более точную характеристику инициирующей способности дают так называемые п р я м ы е м е т о д ы.

Наиболее распространенной из этих методов является проба определения предельного инициирующего заряда. В этой пробе устанавливают то минимальное количество испытуемого вещества, запрессованного под определенным давлением, которое требуется для того, чтобы вызвать полную детонацию тетрила (или другого вторичного ВВ), запрессованного в медную оболочку капсюля-детонатора № 8 под давлением 500 *ат*. Детонация считается полной и, следовательно, заряд инициирующего взрывчатого вещества достаточным (предельным), если отверстие, образованное в свинцовой пластинке толщиной 4 *мм*, будет соответствовать диаметру гильзы.

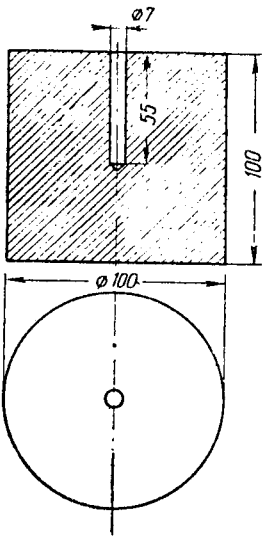


Рис. 76. Свинцовый цилиндр для испытания капсюлей-детонаторов

На основании испытаний указанным методом для самых распространенных инициирующих ВВ установлены предельные заряды, необходимые для того, чтобы вызвать детонацию тетрила и тротила (табл. 31).

Чувствительность инициирующих взрывчатых веществ. Все инициирующие ВВ очень чувствительны к механическим воздействиям. Однако чувствительность одних находится в таких пределах, которые позволяют создать условия сравнительно безопасного обра-

Таблица 31

Предельные заряды некоторых инициирующих взрывчатых веществ

Инициатор	Минимальный заряд инициирующего ВВ, *г*, вызывающий полную детонацию	
	тетрила	тротила
Азид свинца	0,025	0,09
Гремучая ртуть	0,29	0,36

щения с ними, а у других она настолько велика, что использование таких ВВ для промышленных целей невозможно.

Чувствительность к удару. Для определения чувствительности инициирующих ВВ к удару применяют рычажный копер (рис. 77). Вес груза при испытании измеряется в граммах, а высота его падения—в сантиметрах. Испытуемое инициирующее вещество в количестве 0,02 *г* помещают в латунный колпачок капсюля-воспламенителя, запрессовывают под давлением 500—1000 *кг/см*^{2} и прикрывают свободно входящим в колпачок кружком из медной фольги толщиной 0,10—0,12 *мм*.

Таблица 32

Чувствительность к удару некоторых инициирующих ВВ

Наименование ВВ	Вес груза, *г*	Высота падения груза, *см*	
		верхний предел	нижний предел
Гремучая ртуть	690	8,5	5,5
Азид свинца	980	23,0	7,0
Тринитрорезорцинат свинца (ТНРС)	1430	25,0	14,0

Чувствительность инициирующих взрывчатых веществ характеризуют так называемыми верхними и нижними пределами высоты падения груза. Эти высоты должны быть подтверждены результатами 10 параллельных опытов. Нижний предел характеризуется максимальной высотой, при которой еще не происходит ни одного взрыва испытуемого ВВ, а верхний предел—той минимальной высотой, при сбрасывании груза с которой взрываются все навески испытуемого ВВ.

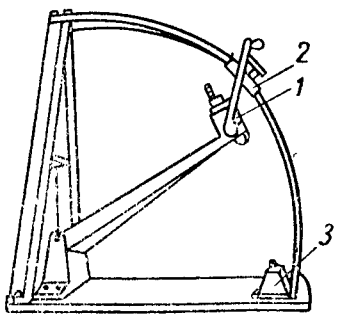


Рис. 77. Рычажный копер: *1*— груз; *2* — сбрасыватель; *3* — стойка с капсюлем, бойком и защитной скобой

Данные о чувствительности к удару широко применяемых в настоящее время инициирующих ВВ приведены в табл. 32.

Чувствительность к трению у инициирующих взрывчатых веществ играет очень существенную роль при решении вопроса о возможности их использования.

Высокая чувствительность инициирующих ВВ к трению опасна не только в производстве средств взрывания, где трение всегда сопутствует таким основным производственным операциям, как прессование, засыпка веществ в гильзы и др., но и при использовании этих средств взрывания. Например, возможен взрыв во время изготовления зажигательных трубок в результате трения огнепроводного шнура о стенки гильзы капсюля, опудренные инициирующими веществами.

Для определения чувствительности к трению инициирующих ВВ применяют приборы, аналогичные описанным в главе 3.

Существующие методы испытания чувствительности взрывчатых веществ к трению так же, как и многие другие характеристики взрывчатых веществ, дают только сравнительные показатели, и об опасности или безопасности применения веществ приходится судить в основном, сопоставляя их характеристики с характеристиками уже опробованных ВВ.

Чувствительность к тепловому импульсу. Инициирующие взрывчатые вещества по температуре вспышки мало отличаются от вторичных ВВ. Способность к воспламенению от огня и искр у них значительно выше, чем у вторичных взрывчатых веществ.

Общие требования к инициирующим ВВ. К инициирующим веществам, применяемым для снаряжения средств взрывания, предъявляют следующие требования:

а) инициирующая способность их должна обеспечивать надежный взрыв вторичного ВВ, применяемого для снаряжения детонаторов (тетрила);

б) в условиях практического использования они должны быть достаточно безопасны и стойки;

в) для удобства снаряжения инициирующие ВВ должны обладать хорошей сыпучестью и прессуемостью.

В соответствии с указанными требованиями наибольшее производственное распространение для снаряжения средств взрывания получили гремучая ртуть, азид свинца и тринитрорезорцинат свинца (ТНРС).

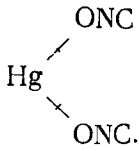
ГРЕМУЧАЯ РТУТЬ

Гремучая ртуть одно из самых распространенных инициирующих взрывчатых веществ. До сравнительно недавнего времени промышленные капсюли-детонаторы снаряжали исключительно гремучей ртутью и лишь последнее время ее частично стали заменять азидом свинца.

Гремучая ртуть относится к классу солей гремучей кислоты — фульминатов. Некоторые соли гремучей кислоты, в частности гремучее золото, были известны еще в период алхимии. О приготовлении гремучей ртути первое письменное указание относится к 1690 г. В более поздний период фульминаты были забыты и только в 1799 г.,

т. е. спустя 109 лет, гремучая ртуть была вторично открыта Говардом.

Долгие годы вопрос о строении гремучей ртути оставался нерешенным, и только химиком Нефом в 1894 г. была установлена принятая и в настоящее время формула гремучей ртути



Гремучая ртуть может быть получена в двух разновидностях—белая и серая. Наиболее вероятным считается, что серая гремучая ртуть получается вследствие засорения ее продуктами осмоления органических веществ.

Свойства белой и серой гремучей ртути практически одинаковы. Белые и серые кристаллы гремучей ртути обладают блеском и имеют шелковистый вид. Удельный вес гремучей ртути колеблется в пределах 4,30—4,42 и зависит от чистоты продукта. Насыпная плотность гремучей ртути 1,22—1,25 *г/см*^{3}. Гремучая ртуть хорошо прессуется. При давлении 300 *кг/см*^{2} она имеет плотность, равную 3,5 *г/см*^{3}.

Чистая гремучая ртуть практически не гигроскопична. Растворимость гремучей ртути в воде низкая. В 100 *г* воды при 12° растворяется всего 0,07 *г*, а при 100°—0,77 *г* гремучей ртути.

Химическое разложение гремучей ртути можно вызвать концентрированными кислотами (азотной, соляной), а также концентрированными щелочами. Последними пользуются для уничтожения небольших количеств гремучей ртути. Слабые щелочи тоже разлагают гремучую ртуть, но медленно. Концентрированная серная кислота вызывает взрыв гремучей ртути.

Сухая гремучая ртуть практически не реагирует с металлами. Однако в присутствии влаги реакция происходит довольно активно. При взаимодействии с медью она образует химические соединения, которые имеют пониженную по сравнению с гремучей ртутью чувствительность к удару и нагреву и резко повышенную чувствительность к трению.

Очень бурно реагирует влажная гремучая ртуть с алюминием, образуя при этом объемистую пористую массу.

Гремучая ртуть химически достаточно устойчива при обыкновенной (15—20°) температуре. С повышением температуры начинается разложение гремучей ртути, причем, чем выше температура, тем быстрее идет разложение. Заметное разложение гремучей ртути наблюдается при длительном нагревании уже при 50°. Более быстрое разложение, но без взрыва, происходит при 90—95°. При этом гремучая ртуть постепенно теряет свои взрывчатые свойства и превращается в коричневый, трудно воспламеняющийся порошок.

Температурой вспышки гремучей ртути принято считать температуру 160—165° (при выдержке до 5 мин.).

Зависимость между температурой вспышки гремучей ртути и временем ее нагрева представляет практический интерес и приведена ниже.

Температура, град.	235	210	200	190	180	170	160	155	150
Время задержки до вспышки, сек.	Взрывается почти мгновенно	5,1	12,1	23,1	52,8	135	339	510	Отказ

Капсюли-детонаторы, снаряженные гремучей ртутью, приходится применять в разных условиях, в том числе и при взрывании горячих массивов, где ВВ и средства взрывания подвергаются воздействию температур. При организации работ в таких условиях необходимо учитывать безопасное время воздействия высоких температур на инициирующие взрывчатые вещества, в частности гремучую ртуть.

От луча огня огнепроводного шнура гремучая ртуть всегда загорается. Порошкообразная гремучая ртуть, взятая в небольших количествах, загораясь, дает вспышку с характерным глухим хлопком, но при этом не получается бризантного эффекта и не проявляются ее инициирующие свойства.

Гремучая ртуть, запрессованная под давлением 250—350 *кг/см²*, воспламеняясь, дает взрыв, при котором проявляются бризантный эффект и инициирующее действие. При более высоких давлениях инициирующее действие гремучей ртути ослабевает.

Увеличивая давление прессования, можно довести гремучую ртуть до состояния «мертвой запрессовки», т. е. когда она, воспламеняясь от луча огня, только выгорает, не инициируя взрыв вторичного ВВ.

Исследователи приводят значения предельного давления от 700 до 2000 *кг/см²*.

Чувствительность к удару гремучей ртути очень высока (см. табл. 32).

Чувствительность к трению. На приборе с вращающейся фарфоровой трущей поверхностью, делающей 20 об/мин, гремучая ртуть взрывается при нагрузке на трущую поверхность 15 *кг*, а при стальной трущей поверхности—12—13 *кг*.

Взрывчатые свойства. Температура взрыва гремучей ртути, вычисленная на основании уравнения взрывчатого разложения, равна 4450°. При разложении 1 *кг* гремучей ртути образуется 311 *л* газообразных продуктов. Скорость детонации гремучей ртути 4500—4850 *м/сек.*

Увлажнение гремучей ртути вызывает сильное снижение ее инициирующей способности. Гремучая ртуть, содержащая 10% влаги, сгорает на открытом воздухе без взрыва, а содержащая 30% влаги, даже не загорается. Аналогично действуют на гремучую ртуть и другие флегматизаторы—парафин, глицерин, жиры и др.

Значительно снижается инициирующая способность гремучей ртути при сильно пониженных температурах. Например, при применении капсюлей-детонаторов, снаряженных гремучей ртутью, для взрыва оксиликвитных патронов могут быть получены массовые отказы.

Физиологическое воздействие. Гремучая ртуть, как и большинство соединений, содержащих ртуть, ядовита. Пыль гремучей ртути вызывает раздражение слизистых оболочек носа, глаз и гортани. Соприкосновение с влажной гремучей ртутью вызывает раздражение кожи и заболевания, напоминающие мокнущую экзему.

Производство гремучей ртути. Масштабы производства гремучей ртути очень малы. Переработка металлической ртути в одном сосуде обычно не превышает 400—500 *г* (что при удельном весе ее 13,6 составляет около 30—37 *см*^{3}).

Исходными продуктами в производстве гремучей ртути, кроме металлической ртути, служат азотная кислота (содержащая обычно

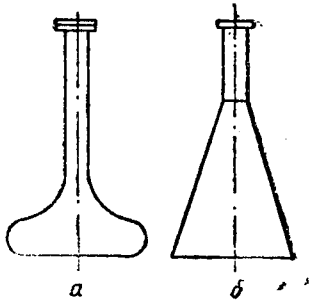


Рис. 78. Сосуды, применяемые при изготовлении гремучей ртути: *а* — журавль; *б* — коническая колба

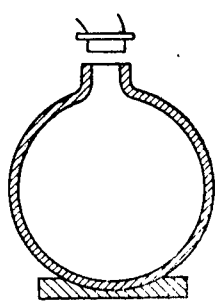


Рис. 79. Реакционная шарообразная колба

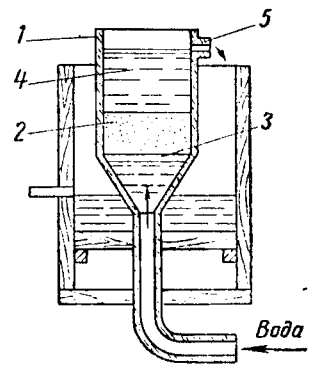


Рис. 80. Промывочный аппарат: *1* — стеклянная воронка; *2* — гремучая ртуть; *3* — ложное дно; *4* — промывная вода; *5* — сливная труба

61,5% моногидрата) и этиловый спирт, содержащий 96% чистого спирта. В качестве вспомогательных продуктов для получения белой гремучей ртути применяют медь и соляную кислоту. Все продукты должны быть химически чистыми.

Вначале в стеклянных колбах с длинным горлом или в конических колбах (рис. 78) приготавливают раствор ртути в азотной кислоте в присутствии небольшого количества соляной кислоты и меди.

Затем в шарообразных реакционных колбах (рис. 79) проводят реакцию взаимодействия раствора ртути в азотной кислоте со спир-

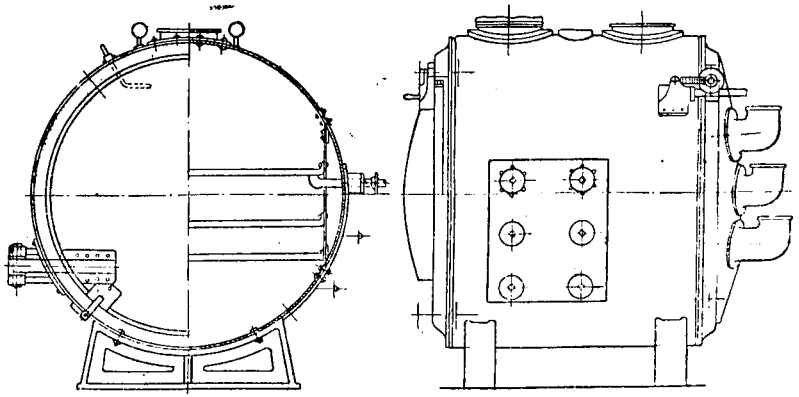


Рис. 81. Схема вакуум-сушильного шкафа

том. В результате этой реакции выпадает белый осадок сырой гремучей ртути.

Сырую гремучую ртуть отделяют от маточного раствора, а затем тщательно промывают водой в промывочном аппарате (рис. 80) до полного удаления кислот и растворимых в воде примесей.

Сушат и просеивают гремучую ртуть (сортируют) только перед использованием для снаряжения. Гремучую ртуть сушат в вакуум-сушильных шкафах (рис. 81) при температуре 40° до содержания остаточной влажности 0,02—0,03%.

Сухую и отсортированную просеиванием (рис. 82) гремучую ртуть в картонных коробках отправляют на снаряжение или в погребки временного хранения.

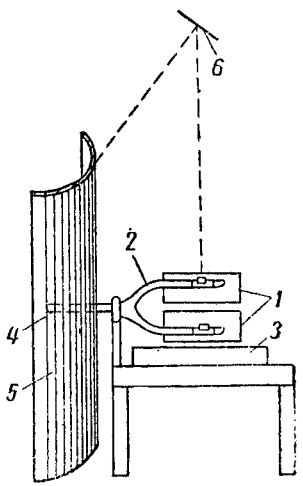


Рис. 82. Схема сортировки гремучей ртути: *1* — сита; *2* — деревянный держатель; *3* — поддон; *4* — рукоятка держателя; *5* — щит; *6* — зеркало

АЗИД СВИНЦА

Азид свинца $Pb(N_3)_2$ представляет собой свинцовую соль азотистоводородной кислоты $H-N\begin{matrix}N\\ \|\\ N\end{matrix}$, которая сама по себе является

чрезвычайно мощным и настолько чувствительным взрывчатым веществом, что даже опыты с самыми малыми ее количествами чаще всего заканчиваются взрывами с большой разрушительной силой.

Азид свинца известен с 1891 г. Предложение о применении его в качестве самостоятельного инициирующего взрывчатого вещества было сделано в 1907 г. Довольно широкое применение его началось в период империалистической войны 1914—1918 годов.

Высокая инициирующая способность азида свинца дает возможность сократить размеры капсюлей и взрывателей, снаряжаемых этим ВВ. Несмотря на наличие у азида свинца ряда недостатков, он все больше и больше вытесняет гремучую ртуть.

К основным недостаткам азида свинца следует отнести чувствительность к действию солнечного света (разложение), возможность самопроизвольных взрывов в процессе изготовления, сравнительно малую чувствительность к лучу огня, недостаточную сыпучесть и плохую прессуемость.

По мере расширения применения азида свинца изыскивались способы устранения многих из перечисленных недостатков.

Азид свинца представляет собой тонкокристаллический порошок белого цвета с удельным весом 4,73. Он малогигроскопичен, практически нерастворим в холодной воде и мало растворим в горячей.

Азид свинца так же, как и гремучая ртуть, способен в присутствии влаги и при повышенных температурах взаимодействовать с некоторыми металлами. Во влажной среде и в присутствии углекислого газа или других кислых продуктов при соприкосновении азида свинца с медью и ее сплавами могут образоваться азиды окисной и закисной меди, а также другие ее соединения, при образовании которых прочность гильзы или пластинки меди нарушается. Особенно опасным является образование азида окисной меди, так как чувствительность его к механическим воздействиям чрезвычайно высока. Нижний предел чувствительности азида окисной меди в 7 раз меньше, чем у азида свинца.

Несмотря на то, что в практических условиях хранения и при исследовании капсюлей, снаряженных в медные оболочки, не было установлено образования азида окисной меди, применение медных или латунных оболочек для средств взрывания, содержащих азид свинца, запрещено.

С алюминием азид свинца не взаимодействует. Не установлено практически заметного взаимодействия азида свинца и с железом.

Чувствительность азида свинца к тепловому импульсу сравнительно невысока. Температура вспышки азида свинца равна 350°. Время задержки вспышки при разных температурах приведено ниже.

Температура, град.	390	360	330	315	310	305	303
Время задержки, сек.	Взрывается почти мгновенно	1,5	10,9	33,4	53,9	123,6	Отказ

Выдержка азида свинца при температуре 50° в течение 3—5 лет не приводит к заметному изменению его свойств. Интенсивное разложение азида свинца происходит при нагревании до 200°. При этом он превращается в невзрывчатый порошок.

Чувствительность азида свинца к лучу огня, особенно в запрессованном виде, несколько ниже, чем у гремучей ртути. Низкие температуры не оказывают заметного влияния на чувствительность азида свинца. Чувствительность к механическим воздействиям азида свинца в значительной степени зависит от размера и формы кристаллов. Крупные кристаллы игольчатой формы способны взрываться даже при изломе. Для мелких кристаллов данные о чувствительности к удару на копре приведены в табл. 32.

Прессование не оказывает заметного влияния на инициирующую способность азида свинца. По данным некоторых исследователей, азид свинца воспламеняется даже запрессованный под давлением около 12000 *кг/см*^{2}.

Теплота взрывчатого разложения азида свинца равна 364 *ккал/кг*. Объем газов, образующихся при взрыве, составляет 308 *л/кг*.

Скорость детонации азида свинца 4500—4800 *м/сек*.

Примесь воды к чистому азиду свинца не флегматизирует его и не изменяет заметно способности к взрыву и к инициирующему действию. Азид свинца хорошо детонирует под водой.

Это свойство азида свинца повышает его ценность как физически стойкого вещества, но одновременно и усложняет его производство, так как на всех стадиях с момента осаждения обращение с ним чрезвычайно опасно.

Производство азида свинца. Производство азида свинца (рис. 83) можно разделить на две основные стадии: получение азида натрия—NaN_3 и азида свинца—$Pb(N_3)_2$.

Первая стадия производства является технологически наиболее сложной, трудоемкой и требует использования сложного оборудования. Она включает в себя несколько самостоятельных процессов:

1) получение закиси азота (N_2O) путем термического разложения аммиачной селитры,

2) получение амида натрия ($NaNH_2$) пропусканием чистого сухого аммиака через расплавленный металлический натрий;

3) получение азида натрия (NaN_3) путем пропускания очищенной сухой закиси азота в расплавленный амид натрия.

Указанные процессы осуществляются в обогреваемых электрическим током аппаратах, расположенных в отдельных производственных помещениях.

Вторая стадия производства состоит из операций приготовления водных растворов азотнокислого свинца и азида натрия и получения азида свинца осаждением из растворов по реакции:

$$Pb(NO_3)_2 + 2NaN_3 \rightarrow Pb(N_3)_2 + 2NaNO_3.$$

Далее следуют операции фильтрации азида свинца, его промывки, флегматизации (парафином), грануляции и сушки.

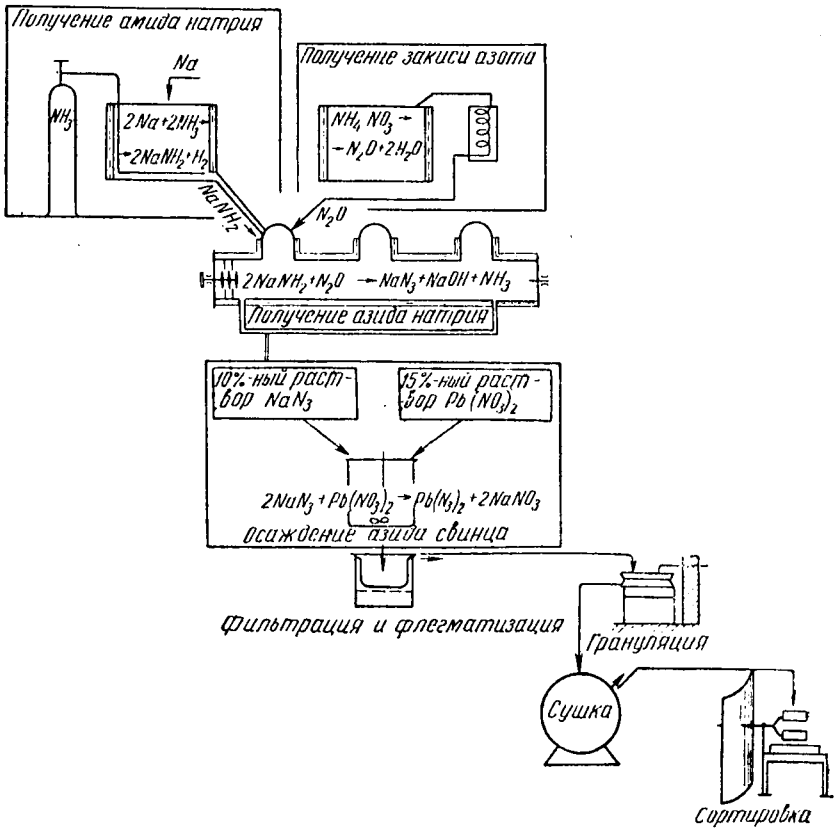


Рис. 83. Схема производства азида свинца

ТРИНИТРОРЕЗОРЦИНАТ (СТИФНАТ) СВИНЦА—ТНРС

Впервые тринитрорезорцинат свинца $C_6H(NO_2)_3O_2Pb \cdot H_2O$ был предложен к применению в ударных составах капсюлей-воспламенителей в 1914 г. Позднее его стали использовать в капсюлях-детонаторах, содержащих азид свинца.

ТНРС представляет собой золотисто-желтые, темнеющие на воздухе кристаллы с удельным весом 3,01. ТНРС физически и химически стоек. Он мало растворим в воде и мало гигроскопичен; с металлами не взаимодействует, и, следовательно, его можно снаряжать в любые оболочки.

Чувствительность к удару у ТНРС ниже, чем у гремучей ртути и азида свинца. По чувствительности к трению ТНРС занимает среднее место между гремучей ртутью и азидом свинца.

Ниже приведено время задержки вспышки ТНРС при разных температурах.

Температура, град.	350	305	275	265	260
Время задержки вспышки, сек.	Вспышка происходит почти мгновенно	8,3	62	143	Отказ

Инициирующая способность ТНРС ниже, чем у гремучей ртути и азида свинца. Даже 2 *г* ТНРС не вызывают детонации тетрила. В связи с этим ТНРС не применяется в качестве самостоятельного инициирующего ВВ, а лишь вместе с азидом. В этом случае ТНРС служит для передачи воспламенения азиду свинца.

Производство тринитрорезорцината (стифната) свинца следует разделить на две самостоятельные стадии: получение тринитрорезорцина $C_6H(OH)_2(NO_2)_3$, который также называют стифниновой кислотой, и получение тринитрорезорцината свинца.

Исходным сырьем для получения тринитрорезорцина (первая стадия) служит резорцин, который вначале сульфируют, обрабатывая концентрированной серной кислотой, а затем нитруют.

Полученный нитрацией тринитрорезорцин отфильтровывают, промывают водой и направляют на сушку или прямо в сыром виде передают на вторую стадию производства для приготовления водной суспензии.

Вторая стадия производства начинается с приготовления тринитрорезорцината натрия путем взаимодействия тринитрорезорцина с углекислым или двууглекислым натрием. Тринитрорезорцинат свинца получают осаждением при взаимодействии растворов тринитрорезорцината натрия и азотнокислого свинца.

Полученный ТНРС промывают, флегматизируют, гранулируют, сушат и отсеивают от пыли и комков (сортируют).

Приготовление в больших количествах ТНРС опасно, так как взрывоопасность его обусловливается не только высокой чувствительностью к механическим воздействиям, но и способностью к электризации. Предполагают, что имевшие место при приготовлении тринитрорезорцината свинца взрывы произошли вследствие его электризации. Поэтому особенно опасными являются операции, выполняемые с сухим ТНРС.

ГЛАВА XXIII

КАПСЮЛИ-ДЕТОНАТОРЫ

Открытие способности некоторых веществ к детонации и создание удобных и сравнительно безопасных способов вызывать детонацию у ВВ явилось поворотным пунктом в истории развития взрывчатых веществ и взрывных работ.

Первым приспособлением для возбуждения детонации ВВ был примененный в 1867 г. капсюль, состоящий из заряда гремучей ртути, помещенной в медную оболочку. Такой капсюль в отличие от применяемых ранее воспламенителей был назван капсюлем-детонатором.

В капсюле-детонаторе заряд инициирующего ВВ, помещенный в сравнительно прочную оболочку, воспламеняется лучом огня и, взрываясь, вызывает в свою очередь детонацию заряда вторичного взрывчатого вещества.

Изобретение капсюля-детонатора открыло путь к эффективному применению в горновзрывном и военном деле мощных взрывчатых веществ. С тех пор капсюль-детонатор изменялся по своей форме, размерам и по инициирующей способности, однако конструкция его в принципе оставалась прежней.

Вначале применяли капсюли-детонаторы, заряд которых состоял только из инициирующего ВВ. Позднее в целях создания более безопасного капсюля-детонатора и в то же время настолько мощного, чтобы можно было надежно возбуждать детонацию всех промышленных ВВ, были применены комбинированные заряды. Такие капсюли-детонаторы получили название комбинированных.

Комбинированные капсюли-детонаторы снаряжают двумя ВВ. Один заряд состоит из минимального количества инициирующего взрывчатого вещества, достаточного для надежного возбуждения взрывчатого разложения во вторичном ВВ, применяемом в качестве второго заряда в капсюле. Для надежности действия капсюлей-детонаторов применяемый заряд инициирующего взрывчатого вещества в несколько раз превышает предельный инициирующий заряд.

Заряд вторичного ВВ в капсюле-детонаторе подбирают, исходя из требований надежности взрывания зарядов промышленных ВВ, сохранения по возможности небольших размеров капсюля-детонато-

ра и сравнительно небольшого разрушительного действия их в случае непредвиденного взрыва.

Инициирующие взрывчатые вещества помещают в капсюль-детонатор запрессованными под оптимальным для каждого ВВ давлением. Гремучую ртуть прессуют под давлением 250 *кг/см²*, а азид свинца с тринитрорезорцинатом свинца — под давлением 350 *кг/см²*.

Запрессовку вторичного ВВ ведут до такой плотности, при которой еще сохраняется хорошая восприимчивость его к взрыву заряда инициирующего ВВ и достигается возможно большее инициирующее действие. Так, тетрил запрессовывают под давлением в пределах 600—1500 *кг/см²*.

С целью повышения безотказности и эффективности действия капсюля-детонатора заряд инициирующего ВВ и небольшую часть вторичного ВВ, непосредственно воспринимающего действие инициатора, заключают в металлическую чашечку. Прочные металлические стенки чашечки затрудняют отток продуктов горения в момент воспламенения инициирующего ВВ и облегчают условия перехода горения в детонацию. Исследованиями было установлено, что в капсюле, снаряженном гремучей ртутью и тротилом, для безотказной детонации тротила требуется гремучей ртути в капсюле с чашечкой 0,36 *г*, а в капсюле без чашечки — больше 1,2 *г*.

Существенное значение имеют также материал чашечки и гильзы капсюля-детонатора и размеры чашечки. Этот материал должен быть достаточно прочным, чтобы обеспечить хороший эффект действия капсюля и не вступать с зарядами ВВ в химическое взаимодействие.

В производстве металлических гремучертутных капсюлей-детонаторов обычно применяют медные гильзы и латунные чашечки.

Применяя такие капсюли-детонаторы, следует учитывать, что они химически стойки только при хранении и применении в условиях, исключающих сильное увлажнение. В присутствии влаги и особенно при повышенных температурах гремучая ртуть может вступать во взаимодействие с медью и латунью. При этом оболочка и чашечка будут терять свою прочность, а гремучая ртуть будет засоряться гремучей медью, отличающейся большей чувствительностью к трению и нагреву.

Для капсюлей-детонаторов, содержащих азид свинца, применяют алюминиевые или бумажные гильзы и алюминиевые чашечки.

В зависимости от величины заряда гремучертутные капсюли-детонаторы были разделены на 10 номеров (табл. 33).

Комбинированные капсюли-детонаторы обозначали теми же номерами, однако инициирующая способность их отличалась от инициирующей способности соответствующих гремучертутных капсюлей-детонаторов.

В настоящее время у нас применяют только гремучертутнотетриловые и азидотетриловые комбинированные капсюли-детонаторы № 8.

Таблица 33

Нумерация гремучертутных капсюлей детонаторов

Номер капсюля детонатора	Заряд гремучей ртути, *г*	Размер гильзы, *мм*		Номер капсюля детонатора	Заряд гремучей ртути, *г*	Размер гильзы, *мм*	
		наружный диаметр	длина			наружный диаметр	длина
1	0,3	6,0	16	6	1,0	6,5	35
2	0,4	6,0	22	7	1,5	6,5	40
3	0,54	6,0	26	8	2,0	7,0	45
4	0,65	6,0	28	9	2,5	7,0	50
5	0,8	6,5	30	10	3,0	7,2	50

Схемы устройства трех основных видов капсюлей-детонаторов приведены на рис. 84.

В наименование капсюля-детонатора входит его номер и первые буквы названия материала гильзы, а для азидотетриловых, кроме того, еще первые буквы названия вещества заряда.

Состав заряда, материал гильз и чашечек и основные размеры капсюлей-детонаторов, выпускаемых в настоящее время, приведены в табл. 34.

Чашечки капсюлей-детонаторов имеют в верхней части отверстия диаметром 2—2,5 *мм* для воспламенения инициирующего вещества лучом огня огнепроводного шнура. В капсюлях-детонаторах № 8-А-ТАТ это отверстие закрывают шелковой сеткой. Применение шелковой сетки в остальных капсюлях-детонаторах не обязательно. В капсюлях-детонаторах с бумажной гильзой в местах посадки чашечки допускается незначительное увеличение диаметра.

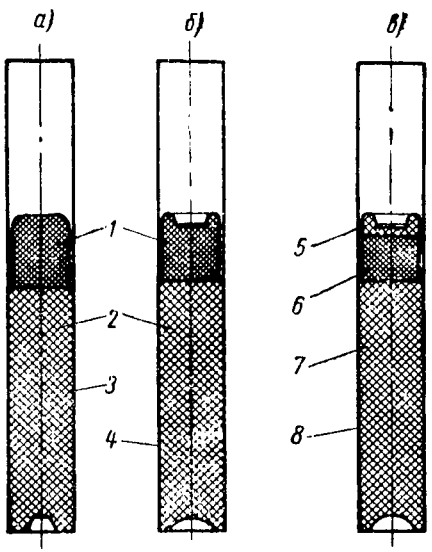


Рис. 84. Схемы устройства капсюлей-детонаторов: *а* — гремучертутнотетриловый в бумажной оболочке; *б* — гремучертутнотетриловый в медной оболочке; *в* — азидотетриловый в алюминиевой оболочке; *1* — гремучая ртуть; *2* и *7* — тетрил; *3* — бумажная гильза; *4* — медная гильза; *5* — ТНРС; *6*—азид свинца; *8* — алюминиевая гильза

Помимо комбинированных гремучертутнотетриловых и азидотетриловых капсюлей-детонаторов большой интерес представляют комбинированные капсюли-детонаторы, в которых в качестве вторичного заряда использованы более мощные взрывчатые ве-

щества—тэн и гексоген. Эти капсюли-детонаторы также обозначены № 8, однако их инициирующая способность выше, чем у гремучертутнотетриловых и азидотетриловых капсюлей-детонаторов.

Таблица 34

Основные характеристики промышленных капсюлей-детонаторов

Наименование капсюля-детонатора	Материал		Состав заряда			
	гильз	чашечек	ТНРС, *г*	азид свинца, *г*	гремучая ртуть, *т*	тетрил, *г*
№ 8-А-ТАТ	Алюминий (1-й сорт)	Алюминий (1-й сорт)	0,1	0,2	—	1,0
№ 8-А-Г-ТАТ	Алюминий (2-й сорт)	Алюминий (2-й сорт)	0,1	0,2	—	1,0
№ 8-М	Медь	Медь или латунь	—	—	0,5	1,0
№ 8-Б	Бумага патронная	Латунь, медь	—	—	0,5	1,0

Продолжение

Наименование капсюля-детонатора	Размеры капсюля, *мм*				Гарантийный срок хранения
	наружный диаметр	внутренний диаметр	высота капсюля	расстояние от дульца капсюля-детонатора до поверхности чашечки	
№ 8-А-ТАТ	6,8—7,05	6,3—6,5	45,5—48,5	15—21	10 лет
№ 8-А-Г-ТАТ	6,8—7,05	6,3—6,5	37±3	15—21	2 года
№ 8-М	6,8—7,05	6,4—6,5	49±2	15—21	2 »
№ 8-Б	7,35—7,65	6,4—6,5	49±2	15—21	2 »

Стандартом на капсюли-детонаторы предусмотрена проверка их пробой на пробитие свинцовой пластинки. Азидотетриловые капсюли-детонаторы должны пробивать отверстие диаметром не менее диаметра капсюля-детонатора в свинцовой пластинке толщиной 6 *мм*, а гремучертутнотетриловые—в свинцовой пластинке толщиной 5 *мм*.

В целях безопасности испытание ведут в чугунном муфеле (рис. 85).

Круглую или квадратную свинцовую пластинку, имеющую соответственно диаметр или сторону, равные 40 *мм*, укладывают на отрезок газовой трубы с наружным диаметром 60 *мм* и внутренним 28 *мм*. В центре свинцовой пластинки строго вертикально ставят капсюль-детонатор с отрезком огнепроводного шнура. Огнепроводный шнур выводят в направляющую втулку длиной 75 *мм*.

По «Единым правилам безопасности при ведении взрывных работ» инициирующая способность капсюлей-детонаторов и пригодность их к взрывным работам проверяют на местах потребления по полноте детонации патронов аммонита. Из подлежащих испытанию

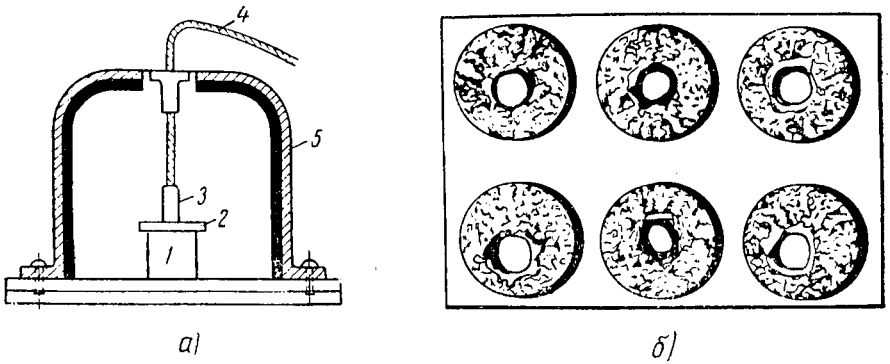


Рис. 85. Схема испытания капсюлей детонаторов в муфеле на пробитие свинцовой пластинки: *а* — общий вид подготовленного к испытанию муфеля; *1*—кольцевая подставка; *2*—свинцовая пластинка; *3* — капсюль-детонатор; *4*—огнепроводный шнур; *5*—защитный муфель; *б*—пробитые пластинки

капсюлей-детонаторов делают зажигательные трубки, а затем с этими трубками готовят патроны-боевики из наименее восприимчивого к детонации аммонита. Каждый патрон-боевик взрывают отдельно и определяют полноту детонации.

На заводе-изготовителе, кроме инициирующей способности капсюлей-детонаторов, проверяют их внешний вид, размеры, устойчивость к тряске, правильность упаковки и маркировки.

Испытанием устойчивости капсюлей-детонаторов к тряске проверяют их безопасность при транспортировке. Испытание ведут на специальном приборе (рис. 86). Двадцать капсюлей-детонаторов дульцами вверх и десять дульцами вниз плотно укладывают в картонную коробку, которую обвязывают шпагатом, и плотно устанавливают на площадку прибора для тряски.

Азидотетриловые капсюли-детонаторы испытывают в течение 10 мин. при высоте падения площадки 15 *см* и 60 ударах в минуту, а гремучертутнотетриловые капсюли-детонаторы в тех же условиях, но в течение 5 минут.

Производство капсюлей-детонаторов. Производство капсюлей-детонаторов состоит из трех самостоятельных стадий: приготовления инициирующих взрывчатых веществ, изготовления гильз и чашечек, снаряжения капсюлей-детонаторов. Приготовление инициирующих ВВ описано в главе XXII.

Металлические гильзы и чашечки изготовляют способами холодной штамповки с последующей полировкой и калибровкой. Бумажные гильзы изготовляют на специальных станках. Гильзам придают негорючесть путем обработки их специальными составами. Для

повышения устойчивости к влаге гильзы лакируют, а затем сушат. Готовые гильзы укладывают в коробки и направляют на снаряжение.

Наибольшее производственное распространение получило раздельное снаряжение капсюлей-детонаторов, при котором заранее с

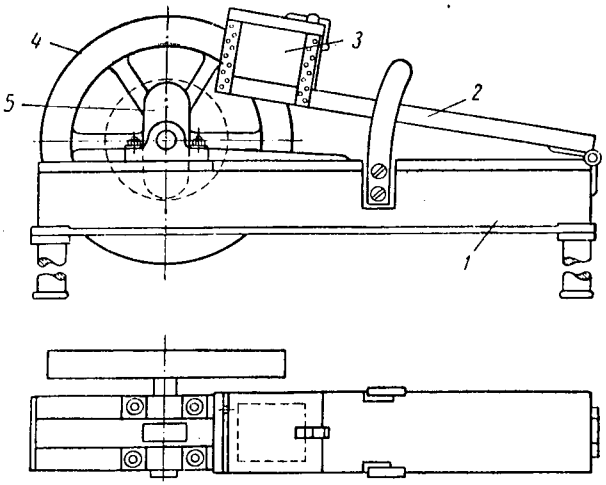


Рис. 86. Прибор для испытания капсюлей тряской: *1*— стол; *2* — доска; *3* — ящик; *4* — маховик; *5* — кулачки

помощью прессования изготавливают заряды вторичного ВВ—тетрила, а затем последовательно проводят сборку всего капсюля-детонатора.

Снаряжение гремучертутнотетриловых капсюлей-детонаторов № 8-Б состоит в основном из следующих операций: прессования тетриловых столбиков, вставки столбиков в гильзы, подготовки гильз к насыпке гремучей ртути, насыпки гремучей ртути, вставки в гильзы металлических чашечек и прессования гремучей ртути вместе с чашечками.

При производстве всех видов капсюлей-детонаторов операции прессования ВВ и все операции с инициирующими ВВ очень опасны и выполняют их раздельно в бронированных кабинах или за щитами.

Снаряженные капсюли-детонаторы тщательно очищают смоченной спиртом марлей от пыли инициирующих ВВ и посторонних загрязнений. Затем лакируют стык чашечки с гильзой и последнюю подсушивают. После этого лакируют открытую поверхность тетрила со стороны дна гильзы и изделия подсушивают вторично. Готовые капсюли-детонаторы упаковывают в коробки по 100 шт.

Капсюли-детонаторы помещают в коробки в вертикальном положении дульцами вверх плотно, чтобы они не могли перемещаться внутри коробок. При укладке последнего капсюля-детонатора под него подкладывают отрезок бу-

мажной ленты, концы которой выступают наружу. Это дает возможность легко вынимать из коробки первый капсюль-детонатор.

Для капсюлей-детонаторов № 8-А-Г-ТАТ, № 8-М и № 8-Б применяют картонные коробки, а для капсюлей-детонаторов № 8-ТАТ жестяные. Последние со всех сторон выкладывают картоном или гофрированной бумагой.

Коробки с детонаторами упаковывают по 5 шт. в картонные футляры. Картонные футляры или жестяные коробки упаковывают в короба из оцинкованного железа и герметизируют пропайкой бескислотным способом. Запаянные короба укладывают в деревянные ящики.

ГЛАВА XXIV

ЭЛЕКТРОДЕТОНАТОРЫ

НАЗНАЧЕНИЕ И СВОЙСТВА ЭЛЕКТРОДЕТОНАТОРОВ

Электродетонатор представляет собой капсюль-детонатор № 8, соединенный с электровоспламенителем, который состоит из мостика накаливания и воспламенительного состава. Он предназначен для сообщения капсюлю-детонатору луча огня, получающегося при сгорании воспламенительного состава. Поджигание воспламенительного состава в свою очередь производят электрическим мостиком накаливания при прохождении через него тока определенной силы.

Промышленность выпускает электродетонаторы двух типов — мгновенного и замедленного действия (рис. 87).

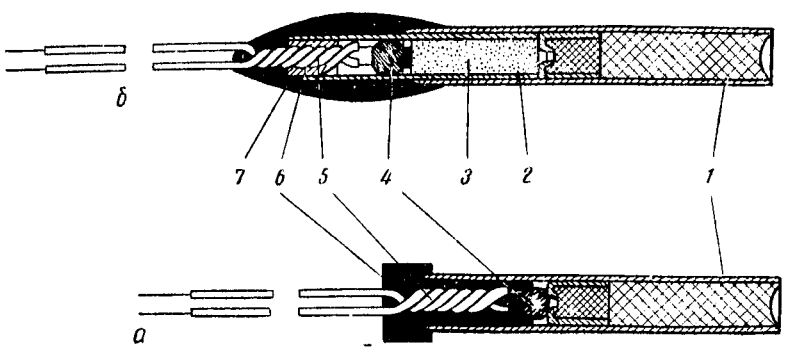


Рис. 87. Схема устройства электродетонаторов: *а* — мгновенного действия, *б*—замедленного действия; *1*—гильза; *2* — гильза замедлителя; *3*—замедлительный состав; *4*—капельный воспламенитель; *5*—проводники; *6*—мастичная пробка; *7*—мастичная изоляция

Электродетонатор замедленного действия отличается от электродетонатора мгновенного действия лишь тем, что у него между электровоспламенителем и капсюлем-детонатором помещен так называемый «замедлитель», который, сгорая за определенное время, со-

здает соответствующее замедление между воспламенением электровоспламенителя и взрывом капсюля-детонатора.

Безотказность действия электродетонаторов зависит от правильного подбора мостика накаливания, который должен сообщить воспламенительному составу достаточное количество тепла, от надежности воспламенения капельного состава (воспламенительного состава, нанесенного на мостик в виде пористой капли) и от интенсивности пламени при сгорании капельки (форса огня).

Электродетонаторы обычно применяют не для одиночных взрывов, а для взрыва серии зарядов. В этом случае электродетонаторы, соединенные между собой и через магистральные провода с источником тока, представляют замкнутую цепь.

Ток по этой цепи может проходить непрерывно до того времени, пока цепь не нарушена. Нарушается цепь при перегорании мостика под действием тока или при взрыве одного или нескольких электродетонаторов.

Если такое нарушение произойдет в тот момент, когда все включенные в цепь электродетонаторы получили достаточный импульс тока и мостики их разогрелись до нужной температуры, то все электродетонаторы должны взорваться. Но если перегорание мостика или взрыв электродетонатора произойдет раньше, чем все мостики выделят достаточное для воспламенения капельного состава количество тепла, то электродетонаторы, не получившие нужного количества тепла, не смогут взорваться, т. е. «откажут».

Учитывая необходимость группового взрывания электродетонаторов при последовательном включении их в цепь, к ним предъявляют требования однородности свойств мостиков, однородности воспламенительного состава и постоянства его скорости горения. Характеристики (параметры) электродетонаторов должны быть такими, чтобы к моменту взрыва самого чувствительного электродетонатора у наименее чувствительного электродетонатора мостик успел сообщить капельному составу количество тепла, достаточное для его воспламенения.

Промышленные электродетонаторы должны надежно взрываться от имеющихся в распоряжении взрывной промышленности источников тока и в то же время быть нечувствительными к блуждающим токам, которые могут создаваться на участках с большой насыщенностью электромеханизмами.

Наша промышленность выпускает электродетонаторы двух степеней чувствительности к току.

Известно, что при пропускании через мостики тока определенной силы большее количество тепла выделит тот мостик, у которого диаметр меньше, а материал имеет большее удельное сопротивление и меньшую теплоемкость. Электродетонатор с таким мостиком является более чувствительным.

Для простоты расчета параметров электродетонаторов пренебрегают тепловыми потерями и принимают, что сила тока достаточно велика, а все тепло расходуется только на разогрев мостика. Из уравнений количества тепла, выделенного током, и количества тепла,

расходуемого на разогрев мостика, выводят следующую зависимость температуры мостика от силы тока, времени его действия и свойств мостика:

$$T = 0{,}39 \frac{\rho}{C\gamma D^4} (I^2 t),$$

и соответственно

$$I^2 t = 2{,}56 \frac{C\gamma}{\rho} D^4 T,$$

где: T — температура мостика;
ρ — удельное сопротивление материала мостика;
C — теплоемкость материала мостика;
γ — плотность материала мостика;
D — диаметр мостика;
I — сила тока, проходящего через мостик;
t — время прохождения тока.

Величина I^2t называется импульсом тока и широко используется при определении и расчете параметров электродетонаторов. Например, зная импульс тока, можно определить силу тока, необходимую для разогрева мостика до заданной температуры в течение определенного времени.

Практически выделяемое током тепло (согласно закона Ленца $Q = 0{,}24 I^2 R t$, где: I—сила тока, R—сопротивление мостика и t—время прохождения тока) расходуется не только на разогрев мостика, но одновременно на разогрев воспламенительного состава, прилегающего к мостику, и в небольшом количестве на разогрев проводов, к которым припаян мостик. Следовательно, на режим работы электровоспламенителя будет также оказывать влияние величина поверхности соприкосновения мостика с воспламенительным составом, длина мостика, способ крепления его с проводами, т. е. все конструктивные особенности электровоспламенителя и технология его изготовления.

Для изготовления электродетонаторов повышенной чувствительности мгновенного или замедленного действия применяют мостик из платино-иридиевой проволоки диаметром 0,024 *мм*. Такие электродетонаторы обозначают ЭД-ПЧП-М или З (электродетонаторы повышенной чувствительности с платиновым мостиком мгновенного или замедленного действия). К этой же группе относятся электродетонаторы с мостиком из нихромовой проволоки диаметром 0,035 *мм* (ЭД-ПЧН-М или З, где буква Н указывает, что мостик нихромовый).

Электродетонаторы нормальной чувствительности мгновенного или замедленного действия делают с мостиком из константановой проволоки диаметром 0,05 *мм* (ЭД-НЧК-М или З). Длина мостиков колеблется в пределах 2—6 *мм*.

Провода промышленных электродетонаторов делают обычно длиной 1,5 *м*, чаще всего из медного провода диаметром 0,5 *мм*, и по заказам—с проводами длиной до 3 *м*. Кроме того, провода электродетонаторов могут быть сделаны из проволоки черных металлов или сплавов.

В зависимости от изоляции провода различают электродетонаторы со звонковым проводом, в котором медная жила покрыта двойной хлопчатобумажной оплеткой, пропитанной парафином, или с проводами с резиновой или полихлорвиниловой изоляцией.

Электродетонаторы с резиновой и полихлорвиниловой изоляцией проводов предназначаются для работ в сырых и обводненных местах, а со звонковым проводом — только в сухих.

Мостик к проводам крепят обычно путем припайки или штамповки. Такой способ крепления мостика называется эластичным.

Последнее время промышленное значение приобрел способ жесткого крепления мостиков, при котором их крепят не непосредственно к проводам, а соединяют с ними через жестко скрепленные и изолированные друг от друга металлические полоски.

Электродетонаторы с эластичным креплением мостиков должны иметь сопротивление в пределах:

с платино-иридиевым мостиком	0,9 ÷ 1,5 *ома*
с нихромовым »	1,5 ÷ 4,5 »
с константановым »	0,7 ÷ 1,7 »

В современных промышленных электродетонаторах воспламенительный состав наносят в виде пористой капли непосредственно на мостик. До настоящего времени наибольшее распространение имел воспламенительный состав из смеси роданистого свинца, хлората калия и цементатора (клея). Однако в последнее время промышленность осваивает изготовление электровоспламенителей с новыми капельными составами, характеризующимися большей скоростью и однородностью горения и высокой чувствительностью к воспламенению.

Для предохранения от увлажнения и механических повреждений капельную головку заливают специальной мастикой. В таком виде электровоспламенитель готов к снаряжению электродетонаторов.

При действии электродетонатора разогретый до определенной температуры капельный состав способен вспыхивать и быстро сгорать. При сгорании получаются твердые и газообразные продукты, которые образуют жгучее пламя, вызывающее взрыв инициирующего ВВ.

Время от момента получения мостиком энергии, достаточной для воспламенения состава, до выхода луча огня из воспламенителя называют временем передачи или иногда временем переноса и обозначают θ.

Не менее важной характеристикой электродетонаторов является время их срабатывания (τ), т .е. то время, которое проходит от момента включения тока до момента взрыва капсюля-детонатора.

Время срабатывания электродетонаторов состоит из времени воспламенения ($t_в$), протекающего от момента включения тока до момента, когда мостик получит энергию, достаточную для воспламенения состава, и времени передачи, т. е.:

$$\tau = t_в + \theta.$$

Время воспламенения состава ($t_в$) зависит от характера разогрева мостика и тепловых свойств воспламенительного состава. Так как материал мостиков и его размеры строго стандартизированы, то можно предполагать, что при пропускании тока через группу электродетонаторов разогрев мостиков, если они не имеют нарушений (раковин, больших припаев и др.), должен быть примерно одинаковым. Тепловые же свойства воспламенительного состава не так однородны, как свойства материала мостика. Механическая смесь компонентов воспламенительного состава имеет пористую структуру, т. е. пронизана воздушными промежутками, которые делают теплопроводность воспламенительного состава в тонких слоях очень неоднородной.

Время передачи (θ) зависит от способности к воспламенению капельного состава и скорости его горения. Малопористые, плотные составы способны к очень быстрому разложению, т. е. к почти мгновенной вспышке. В этом случае время передачи приближается к нулю.

Время передачи имеет очень важное значение при взрывании группы электродетонаторов с разной чувствительностью, так как за время горения воспламенительного состава наиболее чувствительного электродетонатора должен успеть воспламениться наименее чувствительный электродетонатор и тогда вся цепь электродетонаторов взорвется. Если же время передачи наиболее чувствительного электродетонатора очень мало, то он взорвется раньше, чем успеет воспламениться менее чувствительный электродетонатор, и разорвет цепь, тем самым вызовет отказ одного или нескольких электродетонаторов.

Знание времени передачи электродетонаторов бывает необходимо для подсчета силы тока, требующейся для безотказного воспламенения группы последовательно включенных электродетонаторов.

Следует считать, что для безотказности действия электродетонаторов наиболее существенное значение имеет не абсолютная величина времени воспламенения и времени передачи, а максимальное сокращение разброса этих величин, т. е. наибольшая однородность электродетонаторов по этим показателям.

Для электродетонаторов с константановым мостиком и маловосприимчивым воспламенительным составом время передачи может колебаться при наиболее неблагоприятных условиях в пределах от 10 до 60 *мсек*. В практических условиях такой разброс по времени передачи в одной партии электродетонаторов обычно не встречается. Однако значительный разброс по времени передачи все же необходимо иметь в виду при применении электродетонаторов указанного типа.

В настоящее время изготовляют электродетонаторы с разбросом по времени передачи в пределах 1—3 *мсек*.

Режим работы электродетонаторов в очень большой степени зависит также от характеристик тока, используемого для разогрева мостика.

Прежде всего имеет значение сила тока, пропускаемого через мостик. Если она очень мала, то в электровоспламенителе может установиться тепловое равновесие при температуре ниже температуры воспламенения состава, т. е. количество тепла, выделяемого током, будет равно количеству тепла, отводимого в окружающую среду. В этом случае независимо от времени прохождения тока воспламенения состава не произойдет и электродетонатор не сработает.

Ток несколько большей силы, проходя по мостику достаточно продолжительное время, может выделить количество тепла, достаточное для развития реакции в воспламенительном составе. Тогда мостик до воспламенения состава остается целым (не перегорает).

Если же через мостик пропускать ток большой силы, то разогрев будет происходить настолько быстро, что мостик может перегореть (частично или полностью расплавиться) до того, как воспламенительный состав получит количество тепла, необходимое для возбуждения реакции между компонентами. Взорвется или откажет электродетонатор, будет зависеть от того, успеет ли за время охлаждения оставшаяся часть мостика и расплавленный металл передать составу достаточное количество тепла.

Аналогичная картина может быть при пропускании через мостик тока большой силы, но с таким ограничением по времени, при котором мостик не успевает сгореть. Взорвется или откажет электродетонатор в этом случае, будет также зависеть от того, хватит ли тепла, отдаваемого мостиком в процессе охлаждения, для возбуждения реакции в воспламенительном составе.

Пропускание через электровоспламенитель тока недостаточной силы или нормального тока в течение слишком короткого промежутка времени приводит к некоторым изменениям в воспламенительном составе, вызывая его флегматизацию. Поэтому для взрыва электродетонатора, через который был уже пропущен ток не воспламенивший его, требуется ток большей силы, чем это было бы необходимо при однократном пропускании тока. Такое явление называют «тренировкой» воспламенительного состава.

Следовательно, для безотказного и в то же время безопасного применения серии электродетонаторов необходимо пользоваться током соответствующей силы и действующим определенное время.

Электродетонаторы характеризуют следующими параметрами:

Максимальный безопасный ток. Под максимальным безопасным током понимают постоянный ток наибольшей силы, который, проходя по мостику электровоспламенителя неограниченное количество времени (практически около 5 мин.), не вызывает его воспламенения. Зная величину максимального безопасного тока, можно определить безопасность применения электродетонаторов на участках с блуждающими токами, подобрать условия безопасной проверки характеристик электродетонаторов и судить об их устойчивости в различных условиях применения.

Максимальным безопасным током для электродетонаторов с константановым мостиком следует считать ток в 0,4 *а*, а для электродетонаторов с нихромовым мостиком — в 0,2 *а*.

Минимальный безотказный ток. Минимальным безотказным (или воспламеняющим) называют такой постоянный ток минимальной силы, который, действуя на электровоспламенитель без ограничения времени (около 2 мин.), безотказно вызывает его воспламенение.

Для электродетонаторов с константановым мостиком минимальный безопасный ток должен быть порядка 0,7 *а*, а для электродетонаторов с нихромовым и платино-иридиевым мостиками—0,4 *а*.

Импульс воспламенения. Импульсом воспламенения $K_в$ называют то наименьшее значение импульса тока, при действии которого происходит воспламенение электровоспламенителя. Импульс воспламенения

$$K_в = I^2 t_в \ а^2 \cdot сек^*,$$

где: I — неизменный по величине постоянный воспламеняющий ток, *а*;

$t_в$—время воспламенения, сек.

Импульс воспламенения является основным параметром электродетонатора. По величине импульса воспламенения можно определить нужную силу тока, зная время его действия, или, наоборот, определить необходимое время действия тока, зная его силу. По импульсу воспламенения электродетонаторов можно подсчитать минимальную силу тока, необходимую для безотказного воспламенения их при включении последовательно в цепь.

Величину, обратную импульсу воспламенения, называют чувствительностью электродетонатора и выражают:

$$S_в = \frac{1}{K_в} = \frac{1}{I^2 t_в}.$$

Импульс воспламенения электродетонаторов тем меньше, чем меньше диаметр мостика и больше его удельное сопротивление, ниже температура вспышки воспламенительного состава и меньше его плотность. Так как воспламеняемость электровоспламенителей зависит от отвода тепла в воспламенительную головку, а отвод тепла тем больше, чем меньше сила тока, то с уменьшением силы тока импульс воспламенения растет, а с увеличением до некоторого предела уменьшается. Если сила тока будет настолько большой, что тепловые потери не будут практически сказываться на режиме работы электродетонаторов, то импульс воспламенения в этом случае практически будет величиной постоянной, т. е. не зависящей от силы тока.

Исследованиями установлено, что если через электродетонаторы пропускать ток в два раза большей силы, чем сила тока, требующаяся для взрыва электродетонатора при времени действия тока 100 *мсек*, то импульс воспламенения будет относительно постоянным. Такое найденное опытным путем значение импульса воспламе-

---

* Чаще для удобства пользуются величиной в тысячу раз меньшей, а именно—$а^2$ *мсек*.

нения называют номинальным импульсом воспламенения — $K_{ном}$.

Для безотказности действия электродетонаторов имеет значение не абсолютная величина импульсов воспламенения в партии электродетонаторов, а минимальный разброс в величинах импульсов воспламенения, т. е. максимальная однородность параметров электродетонаторов.

К электродетонаторам с константановым мостиком предъявляют требования, чтобы при минимальном времени передачи в 10 *мсек* минимальный импульс воспламенения ($K_{мин}$) был не ниже 25 a^2*мсек*, а максимальный ($K_{макс}$) — не выше 45 a^2*мсек*. У электродетонаторов с нихромовым мостиком минимальный импульс воспламенения должен быть не ниже 1 a^2*мсек*, а максимальный—не выше 4 a^2*мсек* при времени передачи 10 *мсек*.

Гарантийный ток при взрывании электродетонаторов в группах. Гарантийным током ($K_{гар}$) при взрывании в группах называют то минимальное значение силы постоянного тока, которое гарантирует безотказность взрывания любого количества последовательно соединенных в группы электродетонаторов, сильно разнящихся между собой по импульсам воспламенения и имеющих минимальное время передачи ($\Theta_{мин}$).

Расчет гарантийной силы тока можно произвести по формуле:

$$I_{гар} = \sqrt{\frac{K_{макс} - K_{мин}}{\Theta_{мин}}}\ a.$$

Эта формула применима не для всех случаев, однако гарантийная сила тока для электродетонаторов с константановым мостиком может быть по ней рассчитана с достаточной точностью.

Использовав приведенные выше значения величин максимального и минимального импульсов воспламенения и минимального времени передачи, нетрудно подсчитать, что для электродетонаторов с константановым мостиком гарантийная сила тока должна быть:

$$I_{гар} = \sqrt{\frac{45-25}{10}} = 1{,}4\ a.$$

Для электродетонаторов с нихромовым мостиком рекомендуется гарантийную силу тока принимать 0,8 *а*.

Все приведенные величины параметров электродетонаторов относились к случаю воздействия на них постоянного, неизменяемого по величине тока. На практике для взрывания пользуются не только источниками постоянного тока, но и током, изменяющимся по времени и направлению (переменным током) или только по времени (пульсирующим). Пульсирующий ток вырабатывается некоторыми видами взрывных машинок и изменяется от максимального значения до нуля. Очевидно и в этом случае сила гарантийного тока должна быть тем больше, чем больше разброс величины импульсов воспламенения и меньше минимальное значение времени передачи.

А. И. Лурье для случая наибольшего разброса по импульсам воспламенения при наличии в цепи электродетонаторов с наименьшим временем передачи приводит следующие величины безотказной силы тока для электродетонаторов с константановым мостиком:

1) при применении постоянного тока и взрывных машинок типа ПМ-1 — около 2,2 *а*;

2) при использовании переменного тока стандартной частоты (50 *гц*) — около 3,6 *а*.

Выпускаемые с завода электродетонаторы испытывают на безотказность действия, соединенными в группы:

электродетонаторы с платино-иридиевым мостиком, соединенные последовательно по 10 шт. в группе, должны полностью взрываться от машинки типа ПМ-1;

электродетонаторы с нихромовым мостиком, соединенные последовательно в группы по 20 шт., должны взрываться при включении переменного тока нормальной частоты, обеспечивающего силу в 1,4 *а*, а электродетонаторы с константановым мостиком в тех же условиях—при силе тока 2,0 *а*.

Раньше к электродетонаторам предъявляли очень жесткое требование в отношении подбора их по сопротивлениям мостиков. На заводах в одну коробку разрешалось укладывать электродетонаторы, отличающиеся друг от друга по сопротивлению не более чем на 0,05 *ом*. В настоящее время доказано, что такое требование необосновано. Для применения на взрывных работах достаточно, чтобы электродетонаторы с константановым мостиком объединяли по сопротивлениям в группы с разностью сопротивления в 0,3 *ома*, а электродетонаторы с нихромовым мостиком—с разностью сопротивления в 0,5 *ома*.

Однако отказ от столь тщательной сортировки электродетонаторов по сопротивлению мостиков не устраняет самого тщательного контроля за сопротивлением мостиков электродетонаторов как на заводах, так и на местах потребления. Проверяя сопротивление мостиков, можно установить, цел ли мостик, нет ли короткого замыкания между проводниками, неустойчивого контакта между мостиком и проводниками и нет ли серьезных повреждений в мостике (раковины, изменение диаметра и пр.) или в проводах (поломка жилы и т. п.). Любое из указанных повреждений приводит к отказу взрыва электродетонаторов.

ЭЛЕКТРОДЕТОНАТОРЫ ЗАМЕДЛЕННОГО ДЕЙСТВИЯ

Электродетонаторы замедленного действия могут быть двух типов: электродетонаторы с секундным замедлением и так называемые короткозамедленные электродетонаторы, дающие замедление от одной сотой до пяти десятых секунды.

Принцип устройства электродетонаторов с коротким (миллисекундным) замедлением и с секундным один и тот же. Между воспламенителем и капсюлем-детонатором помещают состав, горящий с определенной скоростью и таким образом создающий требуемое замедление.

Требования к однородности свойств замедлительных составов для короткозамедленных электродетонаторов выше, чем для электродетонаторов с секундным замедлением. Для того, чтобы максимально снизить влияние давления газообразных продуктов сгорания на скорость горения замедлителя, в короткозамедленных электродетонаторах применяют замедлители из безгазовых составов, которые подобно термиту при сгорании не дают газообразных продуктов.

Воспламенительный состав для электродетонаторов короткозамедленного действия должен обладать более высокой жгучестью, чем воспламенительный состав для электродетонаторов мгновенного действия и с секундным замедлением.

Электродетонаторы с секундным замедлением выпускают с интервалами замедления 2, 4, 6, 8, 10 и 15 сек. Отклонения, допускаемые в замедлениях, должны находиться для электродетонаторов с замедлениями от 2 до 10 сек. в пределах ± 0,5 сек. и с замедлением 15 сек. — ± 0,85 сек.

Выпускаемые промышленностью электродетонаторы подвергают на заводах тщательным испытаниям, с помощью которых устанавливают, кроме указанных основных параметров электродетонаторов, их водоустойчивость, термостойкость, устойчивость к тряске и прочность крепления электровоспламенителя в гильзе электродетонатора.

Водоустойчивость электродетонаторов с платино-иридиевым мостиком определяют взрыванием после выдержки в воде в течение 6 час. Выдержка в воде всех других электродетонаторов составляет 1 час.

Электродетонаторы с мастичной заливкой дульца испытывают на термостойкость путем выдержки в термостате при 40—45° в течение часа. В результате выдержки при этой температуре не должно быть признаков деформации или оплавления мастики.

Прочность крепления электровоспламенителя в замедлительной гильзе или гильзе капсюля-детонатора определяют подвешиванием к проводникам груза весом 2 *кг* для электродетонаторов с платино-иридиевым мостиком и 1 *кг* для электродетонаторов с константановым и нихромовым мостиками.

На местах использования электродетонаторы проверяют на безотказность действия при групповом подрыве, на прочность крепления электровоспламенителя в гильзе и на водоустойчивость.

Проверка инициирующей способности электродетонаторов ведется так же, как при испытании капсюлей-детонаторов.

У электродетонаторов замедленного действия проверяют еще время замедления.

Производство электродетонаторов. В цехи сборки электродетонаторов в готовом виде доставляют гильзы для замедлителей, капсюли-детонаторы, проводники, проволоку для мостиков, замедлительный состав и мастику.

Непосредственно в цехе выполняют операции по изготовлению воспламенительного состава, электровоспламенителей, по снаряжению замедлителей и сборке электродетонаторов.

Воспламенительный состав готовят путем тщательного смешивания вначале только твердых компонентов, а затем твердых компонентов с добавкой жидкого цементатора.

Воспламенительный состав наносят на мостики окунанием их в массу воспламенительного состава. Полученную таким путем капельную воспламенительную головку заливают мастикой в специальной матрице.

Готовый электровоспламенитель соединяют с капсюлем-детонатором. Дульце электродетонатора заливают мастикой или плотно закрывают пластмассовой пробкой, обжимаемой вместе с дульцем капсюля.

При изготовлении электродетонаторов замедленного действия вначале снаряжают замедлитель в специальной бумажной или латунной гильзе. Готовый замедлитель соединяют с капсюлем- детонатором, а затем вставляют электровоспламенитель в гильзу и герметизируют его с помощью мастики или пластмассовой пробки.

Наружную поверхность электродетонаторов лакируют, погружая их в шеллачный лак.

К проводникам электродетонаторов замедленного действия прикрепляют жетоны с цифрами, указывающими время замедления электродетонатора.

Готовые электродетонаторы упаковывают в картонные коробки, помещаемые в короба из оцинкованного железа, а затем в деревянные ящики.

ГЛАВА XXV

ДЕТОНИРУЮЩИЙ ШНУР

Детонирующим шнуром (ДШ) называют шнур с сердцевиной из детонирующего взрывчатого вещества.

С помощью детонирующего шнура может быть передана детонация от капсюля-детонатора к заряду ВВ или между зарядами ВВ на значительные расстояния.

Идея создания удобного и сравнительно безопасного в обращении «проводника» детонации давно занимала исследователей и производственников. Однако осуществление ее тормозилось тем, что трудно было подобрать такие взрывчатые вещества, которые были бы сравнительно безопасны и экономичны в производстве и устойчиво детонировали в зарядах очень малого диаметра.

В 1879 г. во Франции были применены пироксилиновые шнуры в свинцовой и оловянной оболочках. Прочная металлическая оболочка была необходима для того, чтобы уменьшить диаметр изделия при сохранении детонационной способности сердцевины шнура. Однако изготовление таких шнуров было сложно, а применение — неудобно, вследствие их малой гибкости.

В таких же металлических оболочках изготовляли детонирующие шнуры из динамита, пикриновой кислоты и тротила. В применении эти шнуры были ненадежны. Передача детонации от шнура к шнуру происходила только при плотном соприкосновении обнаженных сердцевин.

Позднее в качестве сердцевины для детонирующих шнуров стали применять флегматизированную гремучую ртуть или ее смеси со вторичным ВВ, что позволило исключить прочную металлическую оболочку у детонирующих шнуров. Однако производство и применение таких шнуров было очень опасным, так как они обладали довольно высокой чувствительностью к пламени и механическим воздействиям. Наблюдались случаи взрыва шнура при резании и при попадании на него искр.

Наибольшее распространение у нас имел гремучертутнотетриловый шнур—ДШ-34. Сердцевина его состояла из смеси 26,5% гремучей ртути с 73% тетрила и 0,5% желатина. Благодаря очень высокой детонационной способности этого шнура при монтировании из него взрывных сетей практически можно было применять любые узлы и соединения.

Несколько позднее были разработаны шнуры с сердцевиной из вторичных ВВ, обладающих высокой восприимчивостью и малым критическим диаметром заряда. Лучшие результаты были получены при снаряжении шнура тэном. Тэновый детонирующий шнур (ДШ-43) вытеснил у нас все остальные виды шнура и сейчас его широко применяют на взрывных работах.

Очень важным фактором для безотказной детонации шнура является создание равномерной по толщине и плотности сердцевины.

Для контроля за качеством сердцевины при выпуске гремучертутнотетрилового шнура пользовались методом рентгеновского просмотра всего шнура.

При переходе на изготовление шнуров, не содержащих гремучей ртути, в целях возможности просмотра их на рентгеновских аппаратах в состав сердцевины шнуров из вторичных ВВ стали вводить небольшое количество свинцовых соединений (например сурик). Такая добавка флегматизирует снаряжаемое ВВ и снижает детонационную способность шнуров.

ДШ-43 уступает по восприимчивости к детонации ДШ-34. В местах перегиба ДШ-43 под углом меньше 90° или при соединении шнура таким образом, что в присоединяемом отрезке волна детонации должна распространяться в направлении, противоположном волне детонации в магистрали, возможны отказы.

В настоящее время этот недостаток в значительной мере устраняют путем применения более совершенной технологии изготовления шнура, что исключает введение в его состав сурика.

Для резкого отличия по внешнему виду от огнепроводного шнура детонирующие шнуры делают красного цвета.

ДШ-43 выпускают в хлопчатобумажной оплетке, покрытой мастикой (рис. 88), или в полихлорвиниловой оболочке. Диаметр его колеблется в пределах от 5,2 до 5,85 *мм*. Вес ВВ в 1 *м* шнура 11,5±

±0,5 *г*. Шнур ДШ-43 можно считать безопасным в обращении. При поджигании он загорается с трудом и быстро затухает. К удару такой ДШ практически нечувствителен. Скорость детонации ДШ-43 составляет 6500—7500 *м/сек*. Шнур имеет сравнительно высокую инициирующую способность, превосходящую инициирующую способность ДШ-34. Благодаря этому в заряд можно не вводить капсюль-детонатор, а инициировать ВВ непосредственно детонирующим шнуром. Это особенно важно при разборке породы после ликвидации отказов, так как в этом случае исключается попадание капсюлей-детонаторов в породу.

Однако ДШ-43 несколько уступает по инициирующей способности капсюлю-детонатору № 8. О неполноте детонации зарядов, инициируемых детонирующим шнуром, свидетельствует, например меньшее отклонение баллистического маятника при взрывании зарядов аммонита № 6, запрессованного до плотности 1,35 *г/см*^{3}. Если отклонение маятника при взрыве зарядов весом 100 *г*, инициируемых

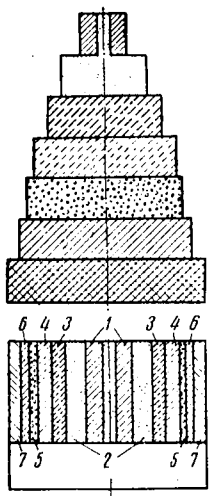


Рис. 88. Детонирующий шнур: *1* — направляющие нити; *2* — тэн; *3* и *4* — двойная хлопчатобумажная оплетка; *5* и *7* — изоляция из воска и озокерита; *6* — хлопчатобумажная оплетка

Рис. 89. Узел из детонирующего шнура

капсюлем-детонатором, находится в пределах 64—79 *мм*, то взрыв таких же зарядов аммонита, инициируемых отрезком детонирующего шнура, дает отклонение 31—55 *мм*.

С понижением плотности инициируемого ВВ различие в действии капсюля-детонатора и детонирующего шнура уменьшается. Так, при определении бризантности одного из образцов аммонита № 6 при

плотности 1 *г/см*^{3} обжатие свинцовых цилиндриков при инициировании капсюлем-детонатором равнялось 16,1 *мм*, а при инициировании шнуром—15,4 *мм*.

Для усиления инициирующей способности ДШ-43 его вводят в инициируемый заряд в виде петли или узла (рис. 89).

В последнее время на некоторых предприятиях получил распространение другой способ заряжания и инициирования зарядов, при котором в скважины по всей длине зарядов пропускают детонирующий шнур.

Во многих литературных источниках можно найти утверждение, что такой способ инициирования ВВ позволяет повысить их взрывчатые характеристики и эффект взрыва, так как взрывчатое разложение происходит якобы не со скоростью детонации, присущей применяемым ВВ, а со скоростью детонации шнура, как правило более высокой, чем у промышленных ВВ.

Однако такое заключение является ошибочным. Вызванная взрывом шнура детонация распространяется не вдоль оси заряда, а в направлении от оси к периферии или, вернее, под некоторым углом к оси. Скорость детонации в этом случае не превышает скорости детонации, присущей данному сорту ВВ. Наоборот, вследствие того, что шнур является более слабым инициатором по сравнению с капсюлем-детонатором, а расстояние для разгона детонации от центра к периферии слишком мало, скорость детонации маловосприимчивых ВВ при осевом инициировании зарядов с помощью детонирующего шнура может быть меньше, чем при обычном инициировании зарядов капсюлем-детонатором.

Но если способность зарядов к передаче детонации вызывает сомнение, приходится в целях срабатывания составного заряда пропускать по его длине ДШ. Причем в ряде случаев возможно некоторое снижение эффекта взрыва, по сравнению с эффектом, получаемым при инициировании каждого заряда капсюлем-детонатором.

Правильное использование ДШ для взрывания большого количества зарядов позволяет эффективно и безопасно вести взрывные работы в обводненных забоях, на участках с большой насыщенностью электромеханизмами, при гидровзрывании, в местах, где зарядка ведется продолжительное время и применение **любых других** средств взрывания создает опасность для обслуживающего персонала, занятого на подготовительных к взрыву работах и пр.

За границей изготовляют детонирующий шнур, который можно применять в шахтах, опасных по газу и пыли.

ДШ успешно используют для взрывания с коротким замедлением. Для этой цели разработаны специальные приборы и приспособления.

Проверка качества детонирующего шнура. Качество ДШ контролируют внешним осмотром и проверкой диаметра, испытаниями на стойкость к нагреву и охлаждению, на водонепроницаемость, прочность, эластичность и на безотказность и скорость детонации.

По внешнему виду ДШ не должен иметь изменений диаметра, видимых на глаз или обнаруживаемых при проверке калибрами. На

оболочке не должно быть заметно трещин или расхождения нитей оплетки.

На устойчивость к повышенным температурам ДШ испытывают, свернув кругами отрезки шнуров. После выдержки их в термостате при температуре 50° не должно быть слипания оболочек шнура в местах соприкосновения кругов и отказов детонации при взрывании шнура капсюлем-детонатором № 8. Проверяемые на стойкость к пониженным температурам отрезки шнура должны безотказно детонировать после выдержки в термостате при температуре — 15°.

Эластичность шнура проверяется четырехкратным перегибанием его в обе стороны на 90°. После перегибаний шнура

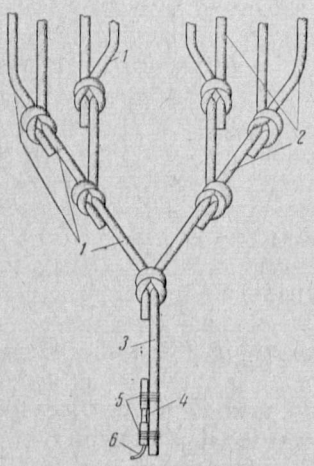


Рис. 90. Схема испытания детонирующего шнура на полноту детонации: *1*—четыре отрезка по 3 *м*; *2*—три отрезка по 3 *м*; *3*—отрезок длиной 4 *м*; *4*—капсюль-детонатор № 8; *5*—шпагат или нитки; *6* — огнепроводный шнур

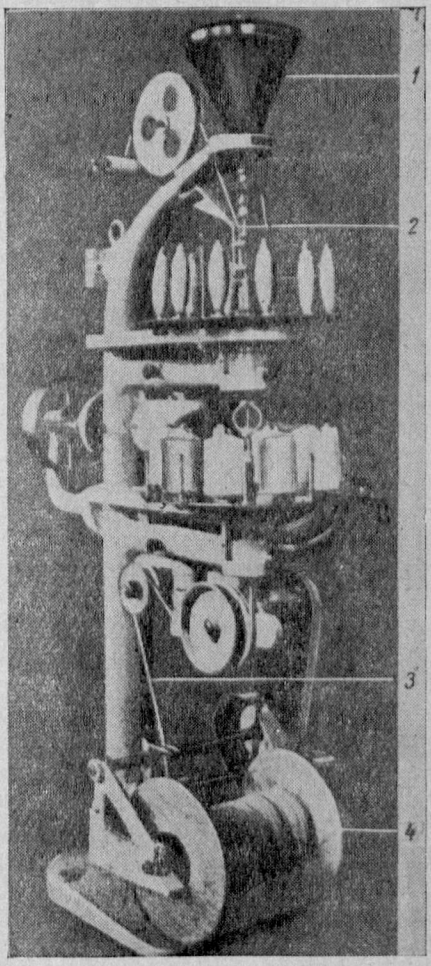


Рис. 91. Станок для производства детонирующего шнура: *1* — воронка для ВВ; *2* — основа; *3* — шнур; *4* — барабан

на оболочке не должно быть изломов и трещин; кроме того, при взрывании не должно наблюдаться отказов детонации.

Водоустойчивость ДШ определяют путем замачивания его в во-

де. Шнур должен полностью детонировать после выдержки в воде на глубине 1 *м* в течение 4 часов.

Полноту детонации шнура проверяют по схеме, приведенной на рис. 90. Отрезки детонирующего шнура, связанные между собой узлами, должны полностью детонировать при взрыве капсюлем-детонатором.

Скорость детонации шнура проверяют методом сравнения со скоростью детонации заранее тарированного шнура или с помощью одного из хронографов.

Изготовление детонирующего шнура. ДШ изготовляют на шнуровом оплеточном станке (рис. 91) с двумя вращающимися в противоположные стороны дисками, на которых расположены катушки с пряжей. В верхней части станка имеется воронка для ссыпания состава. Высыпающаяся из воронки с помощью двух направляющих нитей струйка состава оплетается в воздухе пряжей, направляемой от катушек к месту оплетки через стальной конус с соответствующим числом отверстий (обычно 14, по числу катушек на первом диске).

Шнур с двумя оплетками покрывают мастикой. Затем производят третью оплетку шнура и второе покрытие мастикой разрезают его на куски по 50 *м* и направляют на укупорку.

Детонирующий шнур имеет гарантийный срок хранения не менее 10 лет.

ГЛАВА XXVI

СРЕДСТВА ВОСПЛАМЕНЕНИЯ

ОГНЕПРОВОДНЫЙ ШНУР

Огнепроводным называют шнур с сердцевиной из дымного пороха (рис. 92).

Огнепроводный шнур служит для безопасной передачи луча огня на некоторое расстояние в течение определенных промежутков времени и для воспламенения инициирующего ВВ в капсюлях-детонаторах или пороховых зарядов.

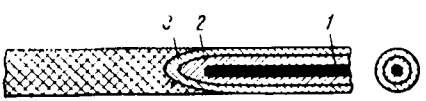


Рис. 92. Огнепроводный шнур: *1* — пороховая сердцевина; *2* — внутренняя оплетка; *3* — внешняя оплетка

В некоторых изделиях отрезки огнепроводного шнура применяют в качестве замедлителей.

Способ передачи огня на расстояние использовали еще во времена применения на взрывных работах только дымного пороха, когда для его воспламенения применяли палочки, обмазанные пороховым тестом, или бумажные трубки с хлопчатобумажными ни-

тями, пропитанными жидкой серой. В 1831 г. англичанин Бикфорд предложил огнепроводный шнур, который в усовершенствованном виде применяется и в настоящее время.

Основным требованием, предъявляемым к огнепроводным шнурам, является требование полноты (безотказности) сгорания и постоянства скорости горения.

В зависимости от скорости горения различают два вида огнепроводного шнура: так называемый нормально горящий и медленно горящий шнуры. Скорость горения нормально горящего огнепроводного шнура должна быть в пределах 0,86—1 *см/сек* (т. е. отрезок огнепроводного шнура длиной 60 *см* должен сгорать за 60 — 69 сек.). Скорость горения медленно горящего огнепроводного шнура находится в пределах 0,48 — 0,56 *см/сек* (т. е. отрезок длиной 60 *см* должен сгорать за 108—126 сек.).

Все виды нормально горящего шнура имеют темно-серую или черную оболочку, а медленно горящий шнур — желтую. Оболочки шнуров покрывают разными мастиками или пластикатами, предохраняющими сердцевину шнура от увлажнения и замокания.

Нормально горящий шнур по видам водо- и влагоизоляционного покрытия различают: гуттаперчевый, полихлорвиниловый, двойной асфальтированный и асфальтированный. Выпуск медленно горящего шнура предусмотрен в полихлорвиниловой и асфальтированной оболочках. Гуттаперчевый, полихлорвиниловый и двойной асфальтированный шнуры предназначаются для работ в обводненных забоях и в воде, а асфальтированный шнур — для работ в сырых и сухих забоях. Внешний диаметр огнепроводного шнура равен 5 — 6 *мм*.

На места потребления шнур поступает отрезками по 10 *м*, свернутыми в круги.

К огнепроводным шнурам предъявляют следующие требования:

1. На поверхности наружной оболочки шнура не должно быть трещин, переломов, следов намокания и промежутков между нитями оплетки.

2. Огнепроводный шнур должен быть достаточно температуростойким. Наружная оболочка шнура при температуре 45° не должна слипаться.

3. При пониженных температурах оболочка шнура не должна быть хрупкой. Шнур в полихлорвиниловой оболочке более стоек и выдерживает охлаждение до температуры —30°, а остальные шнуры до температуры—25°. Шнуры, охлажденные до указанных температур, не должны давать на своей поверхности трещин при изгибании на полуоборот вокруг деревянного стержня. Для испытания полихлорвинилового шнура применяют стержень диаметром 25 *мм*, а для асфальтированных шнуров — 75 *мм*.

4. Огнепроводные шнуры должны быть водо- и влагоустойчивыми. Большей водо- и влагоустойчивостью обладают гуттаперчевые, полихлорвиниловые и двойные асфальтированные шнуры.

Эти шнуры после выдержки в течение 4 час. в воде при температуре 15—20° на глубине не менее 1 *м* не должны изменять своих

размеров (диаметр, длина), а также скорости, полноты и характера горения.

Асфальтированный шнур менее водоустойчив. Его характеристики проверяют после выдержки в воде в течение одного часа.

Во время горения шнура не должно быть хлопков, пробивания искр сквозь оболочку шнура и затуханий. Следует иметь в виду, что при повышенном внешнем давлении шнур горит несколько быстрее, а при пониженном — медленнее, чем при атмосферном.

Зависимость времени горения шнура от внешнего давления выражается уравнением:

$$t_n = t_p - 0{,}04\,(760 - p),$$

где: t_n — время горения шнура, сек., приведенное к давлению, равному 760 *мм* рт. ст.;

t_p — фактическое время горения шнура, сек., при барометрическом давлении, *мм*;

p — барометрическое давление, *мм* ртутного столба, при определении времени горения шнура.

Производство огнепроводного шнура. Для снаряжения огнепроводного шнура применяют специальный шнуровой дымный порох, имеющий следующий состав: калиевой селитры — 78%, угля древесного — 12%, серы — 10%.

В одном погонном метре шнура содержится в среднем 6 *г* пороха.

По характеру технологических операций и применяемому оборудованию производство огнепроводного шнура очень сходно с производством детонирующего шнура.

Перевозка и хранение огнепроводного шнура разрешаются со всеми видами ВВ и средств взрывания, кроме динамитов.

ГЛАВА XXVII

СРЕДСТВА ЗАЖИГАНИЯ (ВОСПЛАМЕНЕНИЯ)

В тех случаях, когда требуется взорвать огневым способом несколько зарядов, необходимо иметь такой источник огня (средство зажигания), который действовал бы непрерывно в отрезок времени, отводящийся на поджигание всех подготовленных к взрыву зарядов, и был достаточно безопасным в обращении.

Зажигательный (тлеющий) фитиль. Простейшим из средств зажигания является так называемый тлеющий, или зажигательный, фитиль (пеньковый), который представляет собой шнур диаметром 6—8 *мм*, состоящий из льняных или хлопчатобумажных нитей, пропитанных раствором калиевой селитры, и оплетки из хлопчатобумажной крученой пряжи. Калиевая селитра служит окислителем, улучшающим горение фитиля.

Отрезок льняного шнура длиной 250 *мм* в местах, защищенных от сильного ветра, сгорает за 25—50 мин. Такой же отрезок хлопчатобумажного фитиля сгорает за 37—62 минуты.

Влажность фитиля должна быть не выше 7%. Фитиль обычно выпускают в бухтах по 50 *м*.

Зажигательные свечи. Удобным средством воспламенения являются зажигательные свечи.

Зажигательные свечи состоят из бумажной гильзы диаметром около 10 *мм* и длиной 175—200 *мм*, в которую помещены два вещества. Один конец гильзы снаряжен горючим веществом, а другой на длину не менее 50 *мм* инертным по отношению к горению веществом. На конце горючей части свечи имеется терочная зажигательная головка, служащая для воспламенения свечи. Некоторые свечи снаряжают не одним горючим веществом, а последовательно двумя составами, дающими при горении разное окрашивание пламени. Непосредственно за терочной головкой располагают зажигательный состав, а затем сигнальный, предупреждающий об истечении времени, отведенного на зажигание.

Свечи горят спокойно, без затухания и дают сильное, достаточно жгучее пламя. Время горения свечей в зависимости от их сорта составляет 1, 2 и 3 минуты.

Свечи упаковывают в коробки вместе с терочными пластинками, с помощью которых подобно спичкам могут быть воспламенены зажигательные свечи.

Горючие составы свечей гигроскопичны и при увлажнении теряют способность гореть.

Патрончики группового зажигания огнепроводного шнура. Большое практическое значение в последнее время получили патрончики для группового зажигания огнепроводного шнура. Их применяют в том случае, когда необходимо одновременно или в очень короткий промежуток времени зажечь значительное количество огнепроводных шнуров.

Патрончики представляют собой бумажные гильзы, покрытые водоизоляцией и снаряженные смесью 87—88% дымного пороха и 12—13% технического вазелина или 80% дымного пороха и 20% солидола. Патрончики делают разных размеров, в зависимости от количества одновременно зажигаемых шнуров (табл. 35).

Таблица 35

Размеры патрончиков для группового зажигания огнепроводного шнура

Количество зажигаемых отрезков огнепроводного шнура	Размер гильз, *мм*		Количество зажигаемых отрезков огнепроводного шнура	Размер гильз, *мм*	
	диаметр	высота		диаметр	высота
3—5	20	60	20—25	40	100
5—9	25	60	25—50	55	120
9—15	30	60	50—75	65	150
15—20	35	80			

Пастообразную горючую воспламенительную смесь дымного пороха и технического вазелина или солидола располагают на дне бумажной гильзы слоем 15—20 *мм*.

Подготовленные к зажиганию и собранные в пучок огнепроводные шнуры *1* (рис. 93) и один воспламеняющий отрезок шнура *2* помещают в гильзу *3* вплотную к зажигательной смеси *4*, после чего гильзу завязывают шпагатом. Зажженный воспламеняющий отрезок шнура зажигает пороховой воспламенительный состав, от которого загораются все помещенные в патрончик шнуры.

Патрончики для группового зажигания огнепроводного шнура могут применяться и при так называемом электроогневом способе взрывания. В этом случае в патрончик вместо отрезка воспламеняющего шнура помещают обычный пиротехнический или другого типа электровоспламенитель (рис. 94).

В качестве одного из видов электровоспламенителя рекомендован воспламенитель, снаряженный тем же составом, что и патрончик группового зажига-

ния. Для воспламенения состава используют мостик из нихромовой проволоки диаметром около 0,2 *мм* и длиной 6—8 *мм*. Такой мостик припаивают к обычным проводникам, помещенным в битумную пробку, вместе с которой мостик

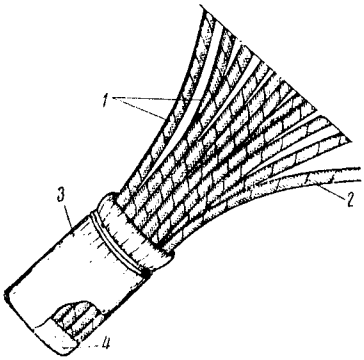


Рис. 93. Патрончик для группового зажигания огнепроводного шнура

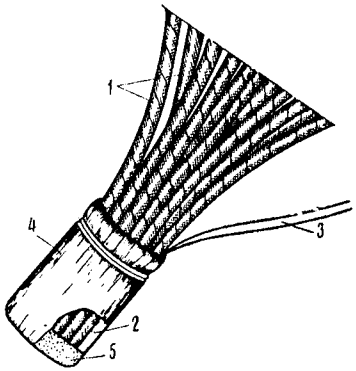


Рис. 94. Патрончик для группового зажигания огнепроводного шнура с электровоспламенителем: *1* — огнепроводные шнуры зажигательных трубок; *2* — электрозапал; *3* — концевики электрозапала; *4* — гильза; *5* — зажигательный состав

вставляют в бумажную гильзу длиной около 50 *мм* и диаметром 8 *мм*. Мостик погружают в воспламенительную массу, предварительно снаряженную в гильзу. Такой электровоспламенитель имеет сопротивление в пределах 0,26—0,38 *ома*.

ЛИТЕРАТУРА

Андреев К. К. Взрыв. М. Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1953.

Андреев К. К. Термическое разложение и горение взрывчатых веществ, М.—Л., Госэнергоиздат, 1957.

Ассонов В. А. Взрывные работы. М., Углетехиздат, 1953.

Бостанжогло К. Ф. Производство нитроглицерина и динамитов. М., Оборонгиз, 1938.

Бубнов П. Ф. Инициирующие взрывчатые вещества. М., Оборонгиз, 1946.

Будников М. А., Левкович Н. А., Быстров И. В., Сиротинский В. Ф., Шехтер Б. И. Взрывчатые вещества и пороха. М., Оборонгиз, 1955.

Горст А. Г. Пороха и взрывчатые вещества. М., Оборонгиз, 1949.

Горст А. Г. Химия и технология нитросоединений. М., Оборонгиз, 1940.

Гольбиндер А. И., Андреев К. К. Антигризутные взрывчатые вещества. М., Углетехиздат, 1947.

Дубнов Л. В. Предохранительные взрывчатые вещества в горной промышленности. М., Углетехиздат, 1953.

Единые правила безопасности при ведении взрывных работ. М., Углетехиздат, 1957.

Зельдович Я. Б., Компанеец А. С. Теория детонации. М., Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1955.

Карпов П. П. Средства инициирования. М., Оборонгиз, 1945.

Красельщик В. Н., Яременко Н. Е., Шетлер Г. А. Динамоны. М., Стройиздат, 1943.

Лурье А. И. Промышленные электродетонаторы. М., Углетехиздат, 1949.

Марченко Л. Н. Оксиликвиты на открытых горных работах. М., Углетехиздат, 1955.

Наум Ф. Нитроглицерин. ГХТИ, 1934.

Покровский Г. И. Взрыв. Военное издательство Министерства обороны Союза ССР, 1954.

Сборник статей по теории взрывчатых веществ. Под редакцией проф. К. К. Андреева и проф. Ю. Б. Харитона. М., Оборонгиз, 1940.

Соколов Н. А. Курс теории взрывчатых веществ. ОНТИ, 1937.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие 3
Введение 4

Часть I

Теория взрывчатых веществ

Глава I. Явление взрыва 7
Глава II. Классификация взрывчатых веществ 12
Глава III. Начальный импульс 15
Чувствительность ВВ к тепловому импульсу 16
Чувствительность ВВ к механическим воздействиям 19
Восприимчивость ВВ к взрыву другого взрывчатого вещества . 25
Глава IV. Стойкость взрывчатых веществ 28
Химическая стойкость 28
Физическая стойкость ВВ 32
Глава V. Основы теории детонации 44
Основные положения 46
Глава VI. Определение детонационной способности взрывчатых веществ. 59
Глава VII. Реакции разложения взрывчатых веществ 66
Кислородный баланс ВВ 67
Глава VIII. Объем и состав газообразных продуктов разложения взрывчатых веществ 73
Глава IX. Теплота и температура взрыва 83
Глава X. Работа взрыва 92
Распределение энергии взрыва 92
Формы работы взрыва 96
Практические методы определения эффективности действия ВВ. 99
Глава XI. Безопасные расстояния при производстве взрывов и хранении взрывчатых веществ 108
Глава XII. Основы теории предохранительных взрывчатых веществ . 113
Представления о механизме воспламенения рудничной атмосферы 113
Практическое определение предохранительных свойств взрывчатых веществ 117

Часть II

Взрывчатые вещества, их свойства и изготовление

Глава XIII. Оксиликвиты 120
Компоненты оксиликвитных ВВ 120
Основные свойства оксиликвитов 122
Способы приготовления оксиликвитных зарядов 126
Глава XIV. Нитросоединения 126
Химическое строение нитросоединений 126
Общая характеристика нитросоединений 128
Способ введения нитрогрупп в органические соединения . . 130
Тринитротолуол (тротил) 132
Пикриновая кислота (тринитрофенол) 135

Тетрил (тринитрофенилметилнитрамин) 136
Гексоген 138
Динитронафталин 139
Глава XV. Аммиачно-селитренные взрывчатые вещества 139
Аммиачная селитра и ее свойства 139
Динамоны 147
Аммониты 150
Классификация аммонитов 156
Технологический процесс приготовления аммиачно-селитренных взрывчатых веществ 163
Глава XVI. Дымные пороха и порохоподобные динамоны 170
Дымные пороха и их свойства 170
Порохоподобные динамоны (динамоны для добычи штучного камня) 172
Глава XVII. Нитроэфиры (нитраты) 174
Нитроглицерин (глицеринтринитрат) 174
Нитрогликоль (этиленгликольдинитрат) 178
Нитродигликоль 179
ТЭН (тетранитропентаэритрит) 180
Глава XVIII. Нитроглицериновые взрывчатые вещества 181
Глава XIX. Бездымные пороха 187
Состав и виды бездымных порохов 188
Свойства бездымных порохов 191
Глава XX. Хлоратные и перхлоратные взрывчатые вещества . . . 195
Хлораты и хлоратные взрывчатые вещества 196
Перхлораты и перхлоратные ВВ 196
Глава XXI. Патроны кардокс и гидрокс 198
Глава XXII. Инициирующие взрывчатые вещества 199
Инициирующие ВВ и их свойства 199
Гремучая ртуть 203
Азид свинца 207
Тринитрорезорцинат (стифнат) свинца — ТНРС 210

Часть III

Средства взрывания и воспламенения

Глава XXIII. Капсюли-детонаторы 212
Глава XXIV. Электродетонаторы 218
Назначение и свойства электродетонаторов 218
Электродетонаторы замедленного действия 226
Глава XXV. Детонирующий шнур 228
Глава XXVI. Средства воспламенения 233
Огнепроводный шнур 233
Глава XXVII. Средства зажигания (воспламенения) 235
Литература 238

Яременко Наталия Евгеньевна
Светлов Борис Яковлевич

Теория и технология промышленных взрывчатых веществ

Научный редактор АПИН А. Я.

Редактор *Т. Н. Федорова* Техн. редактор *П. Г. Гиленсон.*
Корректор В. В. Никольская

Сдано в набор 1/VII—1957 г. Подписано к печати 30/VIII—1957 г.
Бумага 60 × 92¹/₁₆ д. л. 7,5 б. л. 15 п. л. Уч.-изд. 16,6 л.
Т-08409 Изд. № 940 Зак. 570 Тираж 7000 Цена 6 р. 80 к.

Промстройиздат, Москва, Дьяковский пер., 4.
Типография Промстройиздата, г. Подольск, Рабочая ул., 17/2.

ОПЕЧАТКИ

Стр.	Строка		Напечатано	Следует читать
	сверху	снизу		
51	21 и 22		мсек	μсек
56	22		кристаллическую	критическую
69	8		с грамм-атомов	*е* грамм-атомов
136		10	термический	технический
162	В табл.	25	Аммонит П-2	Аммонит АП-2
224	7		безопасный	безотказный

Зак. 570

6 р. 80 к.

Д1
7988

ОНЗ. ЧИТ. З ЛА
НЕ ВЫДАЕТСЯ